

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRANJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor : **Dr. sc. Mladen Šercer**

Student : **Teo Spanjol**

ZAGREB, 2008.

## SAŽETAK

Danas se u svijetu u svim industrijama pokušavaju što više koristiti tzv. zahvalni materijali koji nam za malo uložene energije daju puno veću korist. Naime sa samim poskupljenjem svih oblika energije traže se i načini za njenu uštedu, odnosno manju potrošnju. Već gotovo dva desetljeća, od kad je počela i njegova masovna proizvodnja, pjenasti polistiren nalazi se u samom vrhu ovakvih materijala zbog jednostavne i jeftine proizvodnje te zbog svojih svojstava.

U ovom diplomskom radu opisani su postupci proizvodnje i uporabe pjenastog polistirena, te je navedena sama problematika koja prati plastičarsku industriju pri istim tim postupcima. Proizvodnja pjenastog polistirena danas zauzima veliki dio u ukupnoj proizvodnji polimera, te je u konstantnom porastu.

Kad se govori o uporabi pjenastog polistirena spominju se tri glavna načina: mehaničko i kemijsko recikliranje i energijska uporaba. U daljnjem tekstu obrađena su sva tri načina, s naglaskom na najrašireniji postupak, mehaničko recikliranje. Također je obrađena i tematika vezana uz probleme kod proizvodnje i uporabe pjenastog polistirena.

Kao dodatak teorijskoj razradi ovog diplomskog rada nalazi se i opis jedinog postrojenja u Hrvatskoj za uporabu pjenastog polistirena u tvrtki Plastform d.o.o.

## SADRŽAJ

IZJAVA .....	8
ZAHVALA .....	9
1. UVOD .....	10
2. POVIJEST .....	11
2.1 Povijest polimera .....	11
2.2 Povijest recikliranja .....	15
2.2.1 Alternativni načini recikliranja plastičnog otpada .....	19
2.3.2 Identifikacijski kod polimera (PIC).....	20
3. POLISTIREN .....	21
3.1 Povijest polistirena .....	21
3.2 Proizvodnja pjenastog polistirena (PS-E).....	23
3.3 Upotreba pjenastog polistirena .....	31
3.4 Svojstva pjenastog polistirena .....	35
3.4.1 Trajnost.....	35
3.4.2 Masa .....	35
3.4.3 Prigušenje udara .....	36
3.4.4 Kemijska postojanost .....	36
3.4.5 Postojanost na vlagu.....	37
3.4.6 Zvučna izolacija .....	37
3.4.7 Toplinska izolacija .....	38
4. OPORABA PJENASTOG POLISTIRENA.....	41
4.1 Općenito.....	41
4.2 Životni ciklus pjenastog polistirena.....	43
4.3 Problemi recikliranja pjenastog polistirena .....	45
4.3.1 Odnos mase i volumena, gomilanje otpada.....	46
4.3.2 Potrošnja nafte za proizvodnju.....	47
4.3.3 Štetnost na okoliš i zdravlje .....	48
4.3.3.1 Zrak.....	48
4.3.3.2 Voda i zemlja.....	49

4.3.3.3	Zrak u radnom prostoru .....	49
4.3.3.4	Hrana .....	49
4.3.3.5	Štetnost PS-E-a na zdravlje i okoliš .....	50
4.4	Kratka povijest recikliranja pjenastog polistirena .....	51
4.5	Isplativost recikliranja PS-E-a .....	54
4.6	Postupci uporabe pjenastog polistirena .....	56
4.6.1	Energijska uporaba (spaljivanje pjenastog polistirena).....	57
4.6.2	Kemijsko recikliranje .....	58
4.6.2.1	Piroliza.....	58
4.6.3	Mehaničko recikliranje.....	61
4.6.3.1	Bez promjene volumena –fino mljevenje.....	61
4.6.3.2	Sa smanjenjem volumena .....	64
4.6.3.2.1	Taljenje .....	65
4.6.3.2.2	Otapanje u otapalu .....	80
4.6.3.3	Upotreba recikliranog PS-E-a mehaničkim putem promjene volumena .....	83
5.	PROIZVODNJA I RECIKLIRANJE PS-E-a U TVRTKI <i>PLASTFORM</i> .....	85
5.1	O tvrtki .....	85
5.2	Proizvodi tvrtke <i>Plastform</i> .....	88
5.2.1	Plastopor F.....	89
5.2.2	Plastopor T .....	90
5.2.3	Plastopor 50 (12) .....	91
5.2.4	Plastopor 70 (15) .....	92
5.2.5	Plastopor 100 (20) .....	93
5.2.6	Plastopor 150 (25) .....	94
5.2.7	Plastopor 200 (30) .....	95
5.2.8	Plastopor ploče s nagibom.....	95
5.2.9	Ostali proizvodi .....	96
5.3	Mehaničko recikliranje pjenastog polistirena u tvrtki <i>Plastform</i> .....	98
6.	ZAKLJUČAK .....	107
7.	LITERATURA.....	108

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Ocjene izolacijskih materijala .....	34
Tablica 3.2 Kemijska postojanost .....	36
Tablica 3.3 Porast volumena u %.....	37
Tablica 4.1 Piroliza polistirena.....	59
Tablica 4.2 Udio plinova u % .....	60
Tablica 4.3 Udio otopina u %.....	61
Tablica 4.4 Usporedba hladnog i toplinskog komprimiranja.....	73
Tablica 5.1 Svojstva <i>Plastopora F</i> .....	89
Tablica 5.2 Svojstva <i>Plastopora T</i> .....	90
Tablica 5.3 Svojstva <i>Plastopora 50 (12)</i> .....	91
Tablica 5.4 Svojstva <i>Plastopora 70 (15)</i> .....	92
Tablica 5.5 Svojstva <i>Plastopora 100 (20)</i> .....	93
Tablica 5.6 Svojstva <i>Plastopora 150 (25)</i> .....	94
Tablica 5.7 Svojstva <i>Plastopora 200 (30)</i> .....	95

## POPIS SLIKA:

Slika 2.1 Alexander Parkes .....	11
Slika 2.2 Charles Goodyear.....	12
Slika 2.3 Thomas Hancock.....	12
Slika 2.4 Leo Baekeland.....	13
Slika 2.5 Hermann Staudinger .....	14
Slika 2.6 Identifikacijski kodovi polimera (PIC) .....	20
Slika 3.1 Molekula stirena.....	21
Slika 3.2 Polistiren pod mikroskopom .....	23
Slika 3.3 Tri koraka u preradi pjenastog polistirena .....	24
Slika 3.4 Komora za upjenjivanje .....	25
Slika 3.5 Razlika veličine zrna polistirena prije i poslije upjenjivanja .....	25
Slika 3.6 Drugi korak u procesu prerade.....	26
Slika 3.7 Vreće za dozrijevanje zrna polistirena .....	27
Slika 3.8 Punjenje kalupa s pjenastim polistirenom.....	28
Slika 3.9 Faze grijanja, hlađenja i vađenja otpjenka .....	28
Slika 3.10 Kalupljenje u blokovima.....	29
Slika 3.11 Okomito rezanje.....	30
Slika 3.12 Proizvodi dobiveni rezanjem s vrućom žicom .....	30
Slika 3.13 Upotreba polistirena u prehrambenoj industriji .....	31
Slika 3.14 Upotreba polistirena u transportu.....	32
Slika 3.15 Upotreba PS-E-a u građevini .....	33
Slika 3.16 Smanjenje emisije CO <sub>2</sub> .....	34
Slika 3.17 Ušteda goriva .....	35
Slika 3.18 Toplinska provodnost.....	38
Slika 3.19 Ovisnost toplinskog otpora o temperaturi i gustoći .....	39
Slika 3.20 Usporedba ambalaže od PS-E-a i kartona.....	40
Slika 3.21 Očuvanje vrijednosti vitamina C.....	40
Slika 4.1 Životni ciklus pjenastog polistirena (LCA) .....	44

Slika 4.2 Omjer mase i volumena .....	46
Slika 4.3 Potrošnja nafte po područjima .....	47
Slika 4.4 Količina recikliranog PS-E-a po godinama .....	51
Slika 4.5 Postotak recikliranog u odnosu na proizvedeni PS-E .....	52
Slika 4.6 Proizvodnja, potrošnja i kapacitet PS-E-a.....	53
Slika 4.7 Potrošnja PS-E-a u Europi .....	54
Slika 4.8 Tri vrste recikliranja.....	56
Slika 4.9 Ogrjevna moć .....	57
Slika 4.10 PS-E za popunjavanje praznog prostora u paketima.....	62
Slika 4.11 Zemljani polistiren .....	63
Slika 4.12 Mješavina cementa i polistirena.....	64
Slika 4.13 Koraci recikliranja toplinom .....	65
Slika 4.14 Kante za odvajanje otpada .....	67
Slika 4.15 Hladno komprimiranje .....	69
Slika 4.16 Blok PS-E-a nakon izlaza iz styromelta.....	70
Slika 4.17 Stroj <i>Styromelt</i> .....	71
Slika 4.18 Presjek <i>Styromelta</i> .....	72
Slika 4.19 Ušteda na transportu.....	72
Slika 4.20 Utovarivanje blokova pjenastog polistirena.....	74
Slika 4.21 Silosi za miješanje.....	76
Slika 4.22 Ekstruder .....	77
Slika 4.23 Postrojenje za recikliranje .....	79
Slika 4.24 Razlaganje pomoću limonena .....	80
Slika 4.25 Orange R-net kamioni.....	81
Slika 4.26 Odvajanje polistirena i limonena .....	82
Slika 4.27 Ponovna upotreba mehanički recikliranog PS-E-a .....	83
Slika 4.28 Reciklirani PS-E za izolaciju temelja.....	84
 Slika 5.1 <i>Plastform d.o.o</i> .....	 85
Slika 5.2 ISO 9001 .....	86
Slika 5.3 CE sustav oznaka .....	87
Slika 5.4 Blokovi pjenastog polistirena ispred zgrade Plastforma.....	88

Slika 5.5 <i>Plastopor F</i> spreman za transport .....	90
Slika 5.6 Dekorativni elementi za fasade .....	96
Slika 5.7 Presadnice od PS-E-a tvrtke <i>Plastform</i> .....	97
Slika 5.8 Obrazac pri predaji otpadnog PS-E-a.....	99
Slika 5.9 Dovedeni otpadni PS-E.....	100
Slika 5.10 Usitnjavanje PS-E-a .....	101
Slika 5.11 Ventilator za transport usitnjenog PS-E-a.....	102
Slika 5.12 Silos.....	103
Slika 5.13 Pakiranje usitnjenog otpadnog PS-E-a.....	104
Slika 5.14 Zrna PS-E-a u vrećama .....	105
Slika 5.15 Skladištenje pakiranih zrna PS-E-a.....	106



## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad pisao samostalno, primjenom znanja stečenih na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, te uz korištenje navedene literature.

Teo Spanjol

---

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr.sc. Mladenu Šerceru na pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada. Posebno se zahvaljujem mr.sc. Maji Rujnić-Sokele na nesebičnoj pomoći i strpljenju pri lekturiranju ovog rada.

Također hvala djelatnicima tvrtke Plastform d.o.o. na pomoći i utrošenom vremenu pri mojem obilasku njihovog pogona.

Hvala svim prijateljima koje sam upoznao tijekom ovih godina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na pomoći i suradnji ne samo u okviru studiranja.

Veliko hvala mojoj obitelji, *starcima*, bratu i njegovoj obitelji, noni, te djevojci na velikom razumijevanju, strpljivosti i pomoći kad je to bilo najpotrebnije.

## 1. UVOD

Još od njegove pojave, pjenasti polistiren se zahvaljujući svojim odličnim izolacijskim i zaštitnim svojstvima pokazao kao izvrstan materijal za ambalažu, i to poglavito namirnica u svim oblicima. No unatoč njegovim izvrsnim svojstvima pjenasti polistiren ima i jednu veliku manu, a to je njegov omjer volumena i mase.

Već i sama odluka o nabavi ambalaže od pjenastog polistirena za neku tvrtku je vrlo često teška upravo zbog njenog velikog omjera volumena i mase. Naime najam kamiona predviđenog za prijevoz nekoliko tona tereta u svrhu prijevoza nekoliko stotina kilograma ambalaže od pjenastog polistirena često je *loš* posao. No niti ovdje problem ne prestaje. Restorani, veliki lanci brze hrane i njima slična poduzeća kod kojih jednom upotrebljeni pjenasti polistiren ostaje u njihovom posjedu imaju sad problem njegovog zbrinjavanja.

Jednom kada je taj polistiren (u obliku ambalaže) doveden do željenog cilja i kutija od polistirena otvorena, on postaje otpadni materijal za čiji odvoz i odlaganje netko mora platiti.

Veliki, sada nepraktični komadi (kutije) polistirena iako maseno još uvijek lagani, zauzimaju veliki dio prostora namijenjenog za smeće, te se stoga moraju i češće prazniti što naravno znači i veći trošak.

Ovdje je riječ o milijunima tona otpadnog polistirena, i kada se uzme u obzir odnos mase i volumena polistirena nije teško zamisliti koliko prostora zauzima otpad od polistirena.

U radu će se opisati problem recikliranja polistirena iz dva najvažnija kuta. Iz kuta potrebe za pjenastim polistirenom te iz kuta koji govori o polistirenu kao jednom od najproblematičnijih materijala za recikliranje.

## 2. POVIJEST

### 2.1 Povijest polimera

Razdoblje od 1870. do 1914. nazvano “druga industrijska revolucija” označilo je zlatno doba za polimere. Povijest ostalih materijala je većinom nezabilježena i njihov razvoj potpuno nepoznat, dok je kod polimera situacija drugačija. Naime *otkrivanje* polimera zauzima mjesto u modernom dobu pa su zasluge i inovacije ključnih ljudi potpuno zabilježene i priznate. [1]

Iako se o poznavanju polimera može govoriti čak i u razdoblju 1500. ~ 1600. godine kod naroda Maja u Meksiku i dijelu srednje Amerike, koji su pri svojoj igri rabili loptu od kaučuka, te još nekoliko zapisanih postupaka proizvodnje polimera, ostaje činjenica da ti pioniri *plastike* nisu u potpunosti shvaćali strukturu polimera i njihovu široku paletu mogućnosti upotrebe i stoga se ne spominju kao proizvođači prvog plastičnog materijala. [1]

Kao prvi patentirani polimer spominje se parkezin kojeg je proizveo Aleksander Parkes (slika 2.1) godine 1865. godine. Parkezin se sastojao od polusintetskog materijala na bazi celuloze, prirodnog materijala koji se dobiva od pamuka ili drvnih vlakana. Parkes je svoje otkriće obznanio 1862. u Londonu gdje je zadivio svoje kolege biljarskom kuglom od parkezina. [3]



Slika 2.1 Alexander Parkes [1]

Da svijet još nije bio potpuno spreman na njegovo otkriće govori i činjenica da je njegova tvrtka *Parkesine company* namijenjena masovnoj proizvodnji parkezina neslavno propala ubrzo nakon

osnutka, iako je bitan faktor u tome imalo i Parkesovo inzistiranje na sniženju troškova proizvodnje što je moralo imati utjecaja na samu kvalitetu proizvoda. [1]

Nakon što ljudi sredinom 19. stoljeća uviđaju vrijednost polimera, nastavak razvoja polimera teče ubrzano. [1]

Nešto prije Parkesa, Charles Goodyear (slika 2.2) je čuvši za kaučuk godine 1831. počeo raditi na njegovom usavršavanju, te od tog materijala prvo proizvodi cipele, odjeću i druge proizvode. Godine 1838. upoznaje N. Haywarda te zajedno s njim dolazi do otkrića procesa umrežavanja polimernih molekula, tj. vulkaniziranja (zagrijavali su prirodni kaučuk i sumpor). Nakon nekoliko godina usavršavanja procesa vulkaniziranja (prema rimskom bogu vatre Vulkanu) 1844. Goodyear smatra da je proces dovoljno dobar te ga želi patentirati, samo da bi shvatio da ga je preko oceana pretekao Thomas Hancock (slika 2.3), koji je svoj patent prijavio samo mjesec dana prije njega u Manchesteru. [1]



Slika 2.2 Charles Goodyear [2]



Slika 2.3 Thomas Hancock [3]

Dr. W. Montgomery je 1843. u Singapuru vidio lokalne drvodjelje kako od vrste prirodnog kaučuka oblikuju rukohvate za njihove alate. Kako je bio kirurg shvatio je mogućnost uporabe istog kaučuka kod kirurških alata. Nastaje jedan od prvih višeserijskih proizvedenih polimera, gutaperka (ubrzo rabljen i kao čep na bocama i kao izolator za žice). [1]

Šelak je još jedan od prvih korištenih prirodnih polimera (nastaje kao izmet insekta po imenu *lac*), koji je bio u upotrebi u Kini puno stoljeća prije nego se o polimerima uopće razmišljalo, no u zapadnoj civilizaciji prvi s njim eksperimentira Alfred Crichlow 1850. u smjesi s gutaperkom i koristi ga kao kutiju za čuvanje prvih fotografija. [1]

Francois Charles Lepage godine 1855. patentira još jedan polimer životinjskog porijekla i naziva ga *bois durci*. Proizveden iz smjese piljevine i krvi zagrijavao ga je dok ne postigne željenu tvrdoću, te je kao takav mogao zamjenjivati drvo, kožu, kost ili čak metal. [1]

Godine 1907. Leo Baekeland (slika 2.4) proizvodi prvi sintetski polimer nazvan bakelit reakcijom fenol-formaldehida pri kontroliranoj temperaturi i tlaku.



Slika 2.4 Leo Baekeland [4]

1922. godine Hermann Staudinger (slika 2.5) piše da su polimeri građeni od makromolekula (dugih lanaca atoma držanih zajedno kovalentnim vezama) a budući da se do tada mislilo da su oni građeni od malih molekula držanih zajedno nekom nepoznatom silom njegova teza je odbačena. Kasnije je Staudingeru za to otkriće dodijeljena Nobelova nagrada (1953. godine). [1]



Slika 2.5 Hermann Staudinger [5]

Nakon toga slijedi razvoj mnogih polimera koji su svoju primjenu pronašli u kućanstvu ili industriji, poput celuloze (proizveo John Hyatt), viskoze (Charles Cross i Edward Bevan), poli(vinil – klorida) (Fritz Klatte), urea – formaldehida (Hans John) te napokon i polistirena, najbitnijeg za naše daljnje razlaganje. [1]

## 2.2 Povijest recikliranja

Recikliranje nije ništa novo, niti “izmišljeno” u naše vrijeme. Ono je prisutno u svakodnevnom životu ljudi već tisuće godina. I ne samo ljudi. Priroda reciklira biljke, drveća, insekte i životinje od njenog postanka. Dakle može se reći da je recikliranje staro koliko i sam život.

Zašto reciklirati? Uglavnom zato jer je to samo po sebi pametno raditi. Čak su i prvi ljudi shvaćali da je bacanje stvari koje se mogu iskoristiti glupo.

Važni trenutci u povijesti recikliranja: [4] [5]

- ✚ Prije 65 milijuna godina. Dinosaur usgiba (izumre), padne na zemlju gdje se raspada i reciklira u naftu ili plin. Milijune godina poslije ljudi buše zemlju u potrazi za naftom.
- ✚ Od vremena kad su naši pretci bili lovci, u razdoblju od oko 10 000 godina prije Krista, postoje dokazi korištenja drva kao oružja i kao gorivog materijala, a nakon toga i iskorištavanja kosti ulovljenih životinja u svrhu oružja i kasnije oruđa.
- ✚ 2000 godina prije Krista u europskom brončanom dobu, u Kini ljudi shvaćaju vrijednosti gnojiva i stoga iskorištavaju pepeo drva i ljudskog tijela te ostatke biljaka.
- ✚ U Atini je 500 godina prije Krista osnovano prvo komunalno odlagalište. Senat donosi odluku da se svo smeće mora odvoziti barem 1 kilometar izvan gradskih zidina.
- ✚ 200. godine u Rimu osnovano je prvo gradsko komunalno poduzeće. Dva radnika hodaju po ulicama i skupljaju smeće u kolica.
- ✚ 1031. u Japanu je zabilježeno prvo recikliranje papira. Svi stari papiri i dokumenti se recikliraju i novi se papir prodaje u trgovinama.
- ✚ 1388. Britanski parlament zabranjuje bacanje smeća u jarke i rijeke.



- ✚ Crna smrt (kuga) 1348. dolazi iz Azije i u prvom “pohodu” ubija 30-60 % stanovništva Europe i potpuno nestaje tek početkom 19. stoljeća (u razdoblju od 1340-ih do početka 19. stoljeća ona se konstantno pojavljuje svakih nekoliko desetaka godina). Vjeruje se da su izvor kuge bili veliki gradovi čije su siromašne četvrti doslovno “plivale” u smeću i tako bile pogode za razvoj raznih virusa i bolesti. Daljnje prenošenje prouzročili su štakori.
- ✚ 1400. hrpe smeća ispred zidina Pariza toliko su visoke da ometaju moguću obranu grada.
- ✚ 1690. obitelj Ritteenhouse gradi prvi mlin za recikliranje papira blizu Philadelphie.
- ✚ Za vrijeme Američke revolucije, 1776., pobunjenici recikliraju metale svih vrsta. Sakupljaju se lanci sa starih brodova, lonci, alati...
- ✚ 1801. je sagrađen prvi mlin za proizvodnju papira od materijala koji nije pamuk ili gotovo platno.
- ✚ Za vrijeme kalifornijske “zlatne groznice” nastaje potreba za hranom koja se može sačuvati dulje vrijeme i prenositi na velike udaljenost bez opasnosti da se pokvari. Hrana se pakira u limenke i proizvodnja od 5 milijuna limenki 1849. raste na 30 milijuna pet godina kasnije.
- ✚ 1865. utemeljena je vojska spasa koja se bavi recikliranjem svega što se u to doba moglo reciklirati.
- ✚ 1895. George E. Waring u New Yorku proglašen povjerenikom za gradsku čistoću. On uvodi sustav razvrstavanja otpada radi kasnijeg lakšeg recikliranja.
- ✚ Za vrijeme I. svjetskog rata u Americi je pobuđena svijest o recikliranju. Stari papir postaje vrijednost i po prvi puta cijela je država uključena u neki program recikliranja.
- ✚ Otvoreno je smetlište *Fresh Kills* u New Yorku i uvedena je metoda odlaganja, koja se sastoji od konstantnog zakapanja smeća zemljom. Do današnjeg dana to je najrasprostranjenija metoda gospodarenja otpadom na odlagalištima po cijelom svijetu.

- ✚ U razdoblju od 1939. do 1945. za vrijeme II. svjetskog rata tisuće tona materijala je reciklirano u Americi. Tadašnja retorika glasila je: “Ako imate samo kilogram otpadnog materijala koji se može reciklirati, a ne reciklirate ga, pomažete neprijatelju”. Milijuni ljudi donosili su na mjesta recikliranja sve iskoristivo. Od starih autiju preko kvaka sa vrata, do kopči s remena.
- ✚ 22. travnja 1970. održan je prvi *Dan planeta Zemlje*.
- ✚ 1972. u Oregonu u Americi doveden je zakon po kojem se dodatno plaćaju pića u limenkama i bocama, dok se ista ta prazna ambalaža može unovčiti na mjestima predviđenima za njeno recikliranje. Danas se u Americi dnevno reciklira oko 120 000 limenki svake minute.
- ✚ 22. ožujka 1987. teretnjak *Mobro* isplovlja iz New Yorka noseći 3168 tona smeća (primarno papira) i kreće prema gradu Moorehead City. Tamo je odbijen i brod plovi južno uz obalu sve do Belizea. Nakon što je i tamo odbijen vraća se natrag u New York i vraća smeće od kuda ga je i uzeo. *Mobro* je za to vrijeme prošao oko 6000 milja.
- ✚ 1995. je samo u Americi reciklirano 47,5 milijardi boca i limenki.

Vidljivo je da su se razlozi zbog kojih su ljudi počeli reciklirati mijenjali kroz stoljeća. Recikliralo se zbog potrebe za preživljavanjem, zbog održavanja određene razine čistoće, zbog nedostatka materijala ili jednostavno zbog održavanja ulica čistima. No koji god razlog bio, vidljivo je da su količine recikliranog materijala kroz povijest stalno rasle.

Danas je recikliranje između ostalog i veliki izvor novaca i otvaranja radnih mjesta. U razvijenim zemljama ljudi su danas upućeniji i shvaćaju da ćemo brzinom kojom smo se do sada zatrpavali smećem ubrzo doći do potpunog pretrpavanja svih smetlišta (najsvežiji primjer je Napulj).

Što se tiče recikliranja polimera, ono se razlikuje od recikliranja ostalih materijala po tome što postoji ogroman broj različitih polimera koji svi moraju prije recikliranja biti razvrstani po vrsti, što iziskuje dodatne troškove. Primjerice, metali se mogu razvrstati s pomoću elektromagneta dok za razvrstavanje polimera ne postoji neki sličan sustav, nego se sve radi ručno. Pa čak i kod plastičnih

boca mora se prije recikliranja skinuti čep koji je napravljen od drugačijeg polimera nego sama boca.

Kada se usporedi sa staklom ili metalom, plastika postavlja neke jedinstvene izazove za recikliranje. Glavni od njih je niska entropija miješanja, uzrok koje je velika molekulna masa dugačkih polimernih lanaca. To znači da samo toplinska pobuda (izlaganje toplini) često neće biti dovoljna da stvori smjesu od tako velikih molekula. Zbog ovog nepovoljnog utjecaja na entropiju miješanja, polimeri moraju biti gotovo istog sastava da bi se mogli miješati. Na primjer, različite slitine bazirane na aluminiju se sve rastale u istu kapljevinu u jednoj fazi, dok se razne mješavine kopolimera PET ambalaže od različitih proizvođača ne rastale u jednu fazu kada se zagriju, već teže razdvajanju – kao voda i ulje. Te fazne razlike oslabljuju proizvode napravljene od takvih mješavina, što znači da je većina polimernih mješavina iskoristiva samo u uskom kontekstu. [6]

Drugo ograničenje recikliranju plastičnog otpada je velika količina bojila, punila i drugih dodataka u plastici. Polimeri su općenito previše viskozni da bi se punila ekonomično odvojila, a oštetili bi se mnogim procesima za jeftino uklanjanje dodane boje. Dodatci se manje rabe u ambalaži za pića i plastičnim vrećicama, što im dopušta da budu češće reciklirani. Upotreba biorazgradive plastike se povećava, ali ako se ona miješa s drugom plastikom prilikom recikliranja, novo dobivena plastika postaje manje vrijedna. [6]

### 2.2.1 *Alternativni načini recikliranja plastičnog otpada* [6]

Mnogi navedeni problemi mogu se riješiti primjenom složenijeg postupka recikliranja, *kemijsko recikliranje* u kojem polimer ulazi u proces invertan procesu polimerizacije primjenjene za njegovo stvaranje. Ovako se proizvodi ista mješavina kemikalija koja je činila originalni polimer, koja može biti pročišćena i primjenjena za sintetiziranje novog polimernog lanca istog tipa. Ovaj proces je vrlo skup i neekonomičan.

Drugi način je pretvaranje miješanih polimera u naftu s manje preciznim postupkom toplinske depolimerizacije. Ovim postupkom mogu se reciklirati gotovi svi polimeri ili mješavine polimera, kao što je guma ili biopolimeri u ptičjim perima ili drugom poljoprivrednom otpadu. Kao i prirodna nafta, i iz umjetno proizvedene se može praviti gorivo ili drugi polimeri. Pilot projekt postoji u Cathage-u, Missouri, SAD, a koristi se otpad od purica.








Jedan od postupaka koji postaje zanimljiv je i toplinsko stlačivanje. Ovim postupkom se sva nerazvrstana, očišćena plastika svih oblika miješa u velikom rotirajućem bubnju sličnom sušilu za rublje (eng. *tumbler*). Proces proizvodi toplinu od međusobnog trenja dijelova plastike unutar bubnja, koja tali sav materijal ili gotovo sav materijal. Materijal se kasnije ispumpa iz bubnjeva kroz grijane cijevi u module za lijevanje. Najveća prednost ovog postupka je taj što se sva plastika reciklira, a ne samo dijelovi koji su jednaki. Problem je veliki utrošak energije na bubnjeve i grijane cijevi.

### 2.3.2 Identifikacijski kod polimera (PIC) [7]

Najrašireniji tipovi plastičnih materijala imaju dodijeljen identifikacijski kod (brojevi od 1 do 7), koji je uglavnom uprešan ili isprintan na neko mjesto na proizvodu koje na prvi pogled nije vidljivo (zbog samog izgleda). Taj kod je okružen trokutom strelica u smjeru kazaljke na satu.

Šest vrsta polimernih materijala, svaki sa svojim specifičnim svojstvima rabe se diljem svijeta u ambalažnim pakiranjima i svaki je prepoznatljiv po svom identifikacijskom broju. Ispod trokuta strelica nalazi se kratica za polimer o kojem se radi.

Na slici 2.6 prikazani su identifikacijski brojevi koji su (PIC – Plastic Identification Code) uvedeni 1988. od strane Društva plastičara da bi se olakšao i ubrzao proces razvrstavanja polimera po vrstama.

 <b>PET</b>	<b>POLI (ETILEN - TEREFTALAT)</b>  Reciklira se da bi se proizvela poliesterna vlakna, flastera, mekih boca za pića, termo-izolacionih ploča.	 <b>PP</b>	<b>POLIPROPILEN</b>  Reciklira se u razne dijelove za vozila i industrijska vlakna, za palete, četke i metle, kućišta akumulatora
 <b>PE-HD</b>	<b>POLIETILEN VISOKE GUSTOĆE</b>  Reciklira se da bi se proizvele boce, kutije za namirnice, kante za recikliranje, poljoprivredne cijevi, šalice, plastično drvo.	 <b>PS</b>	<b>POLISTIREN</b>  Toplinska izolacija, termometri, okviri automobilskih tablica, prekidači za struju, kućišta video kazeta, kutije za jaja.
 <b>PVC</b>	<b>POLI (VINIL - KLORID)</b>  Reciklira se da bi se proizvele cijevi, ograde, kabele, cijevi, spojnice, parketi, kućišta za razvodne kutije...	 <b>7</b>	<b>OSTALI VIŠESLOJNI (LAMINIRANI) MATERIJALI</b>  Reciklira se za dijelove za auto i umjetno drvo
 <b>PE-LD</b>	<b>POLIETILEN NISKE GUSTOĆE</b>  Reciklira se da bi se proizvele plastične vrećice, razni kontejneri, razne boce, cijevi i razna laboratorijska oprema.		

Slika 2.6 Identifikacijski kodovi polimera (PIC) [7]

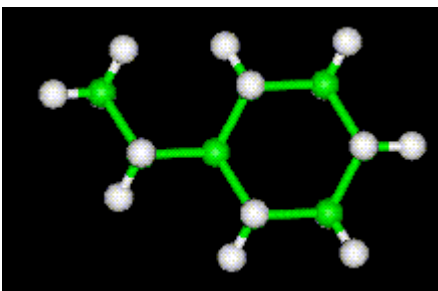
### 3. POLISTIREN

#### 3.1 Povijest polistirena [1]

Riječ polimer dolazi od grčkih riječi *poli* što znači mnogo i *meros* što znači dio ili jedinica. Dakle polimer znači mnogo dijelova ili jedinica (treba puno monomera da bi se dobio polimer). Polimer se često rabi kao sinonim za plastiku, iako postoji mnogo bioloških i anorganskih molekula koje su također polimeri. Stoga se izraz plastika ili plastičnost rabi češće kad se želi iskazati kako se neki materijal ponaša pod djelovanjem neke sile ili kad se zagrijava.

Godine 1831. M. Bonastre prvi je destilirao uljnu tvar iz smole (storaksa) drva *Iquidamber orientalis*, tzv. Turskog drva i nazvao ju stiren. S istom tom tvari pokuse je nastavio Eduard Simon i primijetio da se nakon određenog vremena skladištenja stiren skrutio i pretvorio u želatinoznu tvorevinu. Simon je pretpostavio da je došlo do oksidacije i nazvao novu tvorevinu stiren-oksidi.

Tek su August Wilhem von Hofmann i John Blyth 1845. pokazali da se ista ta transformacija stirena može odvijati i u atmosferi bez kisika. Oni su svoju tvorevinu nazvali *metastirol*, a kasnije su analize pokazale da je on kemijski identičan stiren-oksidu. Godine 1866. Marcelin Berthelot je identificirao pretvorbu stirena u metastiren kao proces polimerizacije. Trebalo je proći još oko 80 godina da bi znanstvenici shvatili da zagrijavanje stirena dovodi do lančane reakcije pri kojoj se izlučuju makromolekule. Hermann Staudinger je upravo proučavajući stiren došao da svoje teze o građi polimera kao nizu vezanih makromolekula (slika 3.1) 1922. godine.



Slika 3.1 Molekula stirena [6]

Stirenov potencijal kao krutine dalje su istraživali 1902. Kronstein i 1911. Matthews ali su rezultati bili konstantno narušavani od strane prerane solidifikacije monomera stirena u procesu polimerizacije. Desetak godina nakon Matthews, C. Dufraisse i C. Moureu otkrivaju da se monomer može stabilizirati dodatkom malih količina amina i fenola.

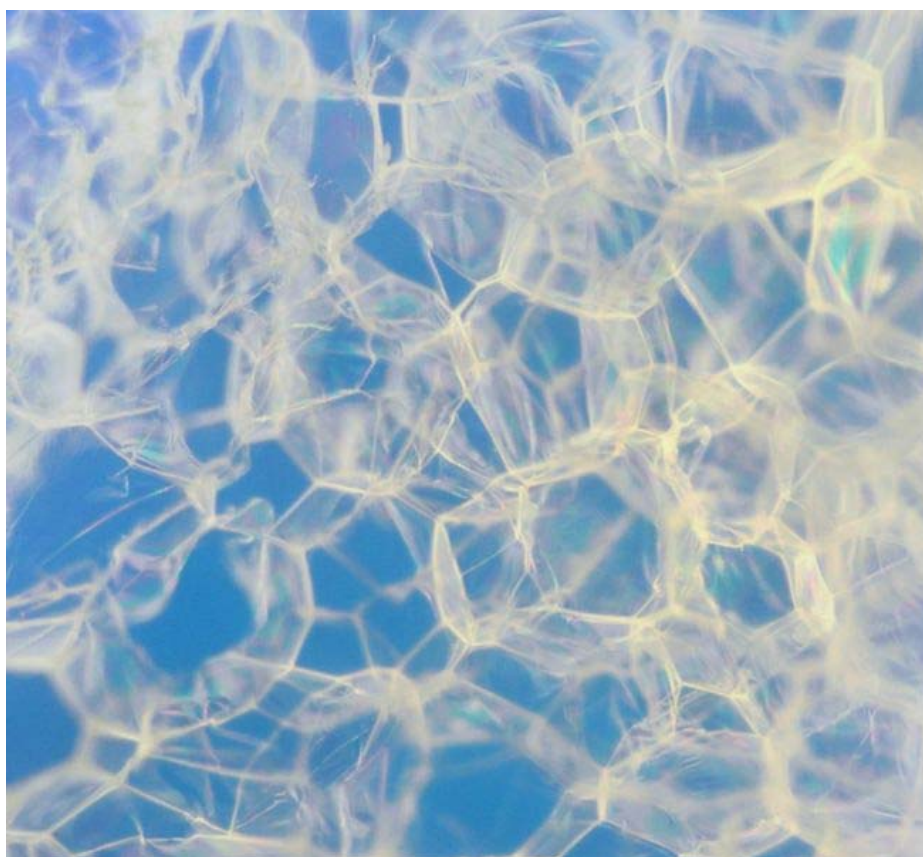
Za komercijalizaciju stirena moralo se čekati do 1929. godine. Otprilike u isto vrijeme tvrtka *I.G. Farben* u Njemačkoj (kasnije poznata po stvaranju ciklona B, plina korištenog u koncentracijskim logorima za vrijeme II. svjetskog rata) i *Dow Chemicals* u Americi počinju sa serijskom proizvodnjom stirena u nadi da će zamijeniti lijevani cink.

Pravi *boom* u masovnoj proizvodnji stirena dogodio se za vrijeme II. svjetskog rata, posebno u svrhu proizvodnje sintetskog kaučuka. Pristupačnost i niska cijena stirena nakon rata dovodi do daljnjeg rasta u proizvodnji, a jedan od tadašnjih glavnih razloga je bio velik raspon boja koji je beskonačan budući da je stiren bezbojan i proziran. Problem njegove krhkosti bio je riješen miješanjem s kaučukom iako se tako žrtvovala njegova čistoća.

### 3.2 Proizvodnja pjenastog polistirena (PS-E)

Polistiren je plastomer koji može biti konstantno zagrijavan i oblikovan više puta. Oblik molekula kod polimera je u pravilu linearan, ili lagano razgranat, što im omogućava da teku pod tlakom kad su zagrijani iznad tališta. [8]

Polistiren je amorfni plastomer s povećim molekulnim lancima koji su kruti i nemaju mogućnost da se dovoljno zgusnu i tako oblikuju kristale (slika 3.2). Još neki amorfni polimeri su: polikarbonat, akrilat, ABS. Amorfni polimeri se slabo skupljaju, providni su, stupnjevito omekšavaju kad su zagrijavani, imaju lošu ili slabu kemijsku postojanost, visoki koeficijent trenja i slabu ili nisku otpornost na trošenje. [8]



Slika 3.2 Polistiren pod mikroskopom [9]

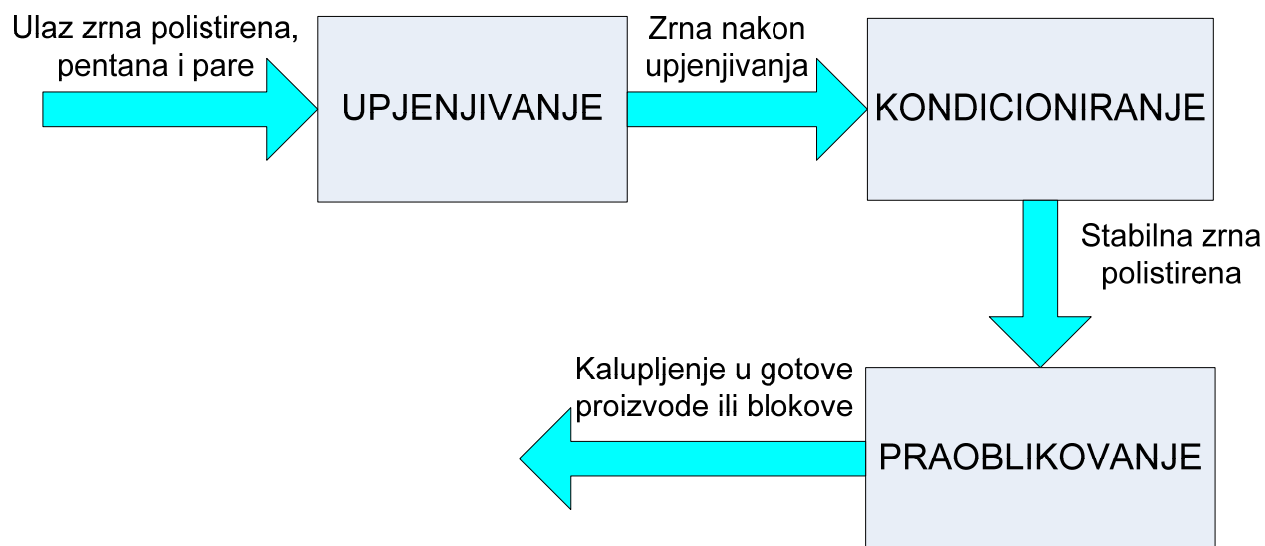


Polistiren se proizvodi kemijskom reakcijom u visokim komorama pod djelovanjem tlaka i temperature (polimerizacija). Za vrijeme polimerizacije dodaju se pjenila (najčešće pentan) i usporavala da bi se dobila modificirana zrna smole potrebne za proizvodnju pjenastog polistirena (PS-E). Proces polimerizacije počinje dodavanjem katalizatora koji lomi dvostruku vezu između molekula i stvara dvije veze koje su vežu za druge monomere ili polimerne molekule. Polimerizacija se nastavlja sve dok katalizator nije potpuno istrošen. Duljina molekula ovisi o broju molekula monomera koje se mogu spojiti na novonastalu vezu (sada lanac) prije nestanka katalizatora. [8]

Danas su proizvođači zrnja u mogućnosti da proizvođačima PS-E-a ponude zrna željenih promjera i dodataka.

Za razliku od ostalih postupaka preradbe plastomera, proizvodnja PS-E-a zahtijeva da polistiren bude već predobrađen prije njegovog posljednjeg postupka kalupljenja. Taj materijal (poznat kao pjenasti polistiren) ima oblik sfere i po izgledu je sličan šećeru.

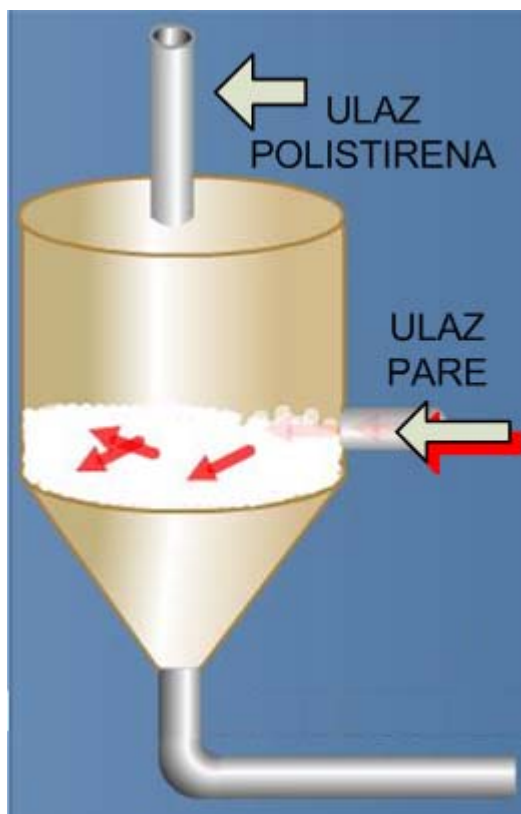
Postupak prerade provodi se u tri koraka (slika 3.3):



Slika 3.3 Tri koraka u preradi pjenastog polistirena

## 1. UPJENJIVANJE

Na slici 3.5 vide se sitna sferična zrna polistirena koja ekspandiraju do približno 40 % njihovog početnog volumena koristeći male količine plina pentana (uzima se oko 5 % od ukupne mase zrna polistirena) kao pjenila. Promjer zrna na početku pjenjenja kreće se od 0,25 do 2,5 milimetara. Slika 3.4 prikazuje prvi korak prerade koji uključuje zagrijavanje zrna, korištenje struje pare koja uzrokuje napuhavanje pentana i tako se oblikuju saće. O temperaturi i trajanju procesa zagrijavanja ovisi gustoća zrna, tj. količina preostalog plina.



Slika 3.4 Komora za upjenjivanje [10]



Slika 3.5 Razlika veličine zrna polistirena prije i poslije upjenjivanja [10]

## 2. KONDICIONIRANJE

Kako se materijal hladi, pentan postaje kapljeviti i stvara se djelomični podtlak unutar zrna. Zrna se stavljaju u komore ili platnene vreće za kondicioniranje (slika 3.6) i tamo drže oko 12 sati i tako se izdvaja vlaga i dopušta se da se izjednače razlike tlakova da bi se dobile stabilne granule.



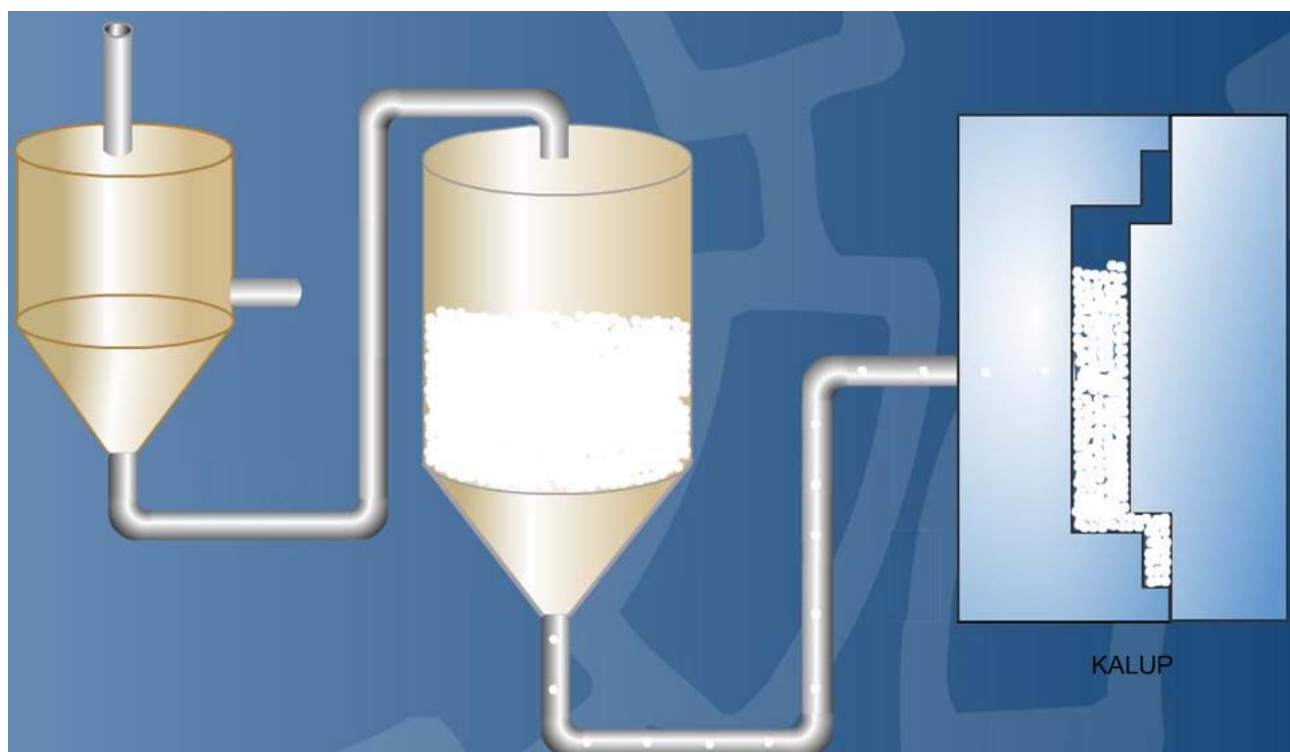
Slika 3.6 Drugi korak u procesu prerade [10]



Slika 3.7 Vreće za dozrijevanje zrna polistirena [8]

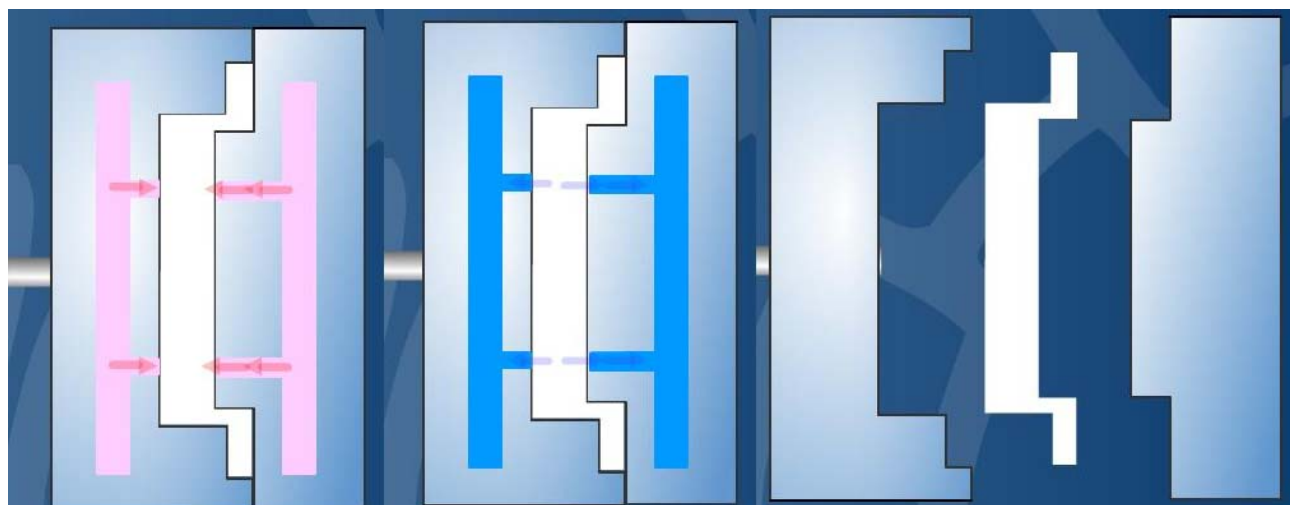
### 3. PRAOBLIKOVANJE

U ovoj posljednjoj fazi, upjenjena, stabilizirana zrna ulaze u kalup (slika 3.8) te se ponovo zagrijavaju pomoću pare koja struji kroz kanale u kalupu. Posljednja ekspanzija uzima maha i zrna se sabijaju i spajaju pri popunjavanju kalupa i tako stvaraju traženi oblik. Potom se kalup hladi i otpjenak vadi (slika 3.9). U ovom zadnjem obliku PS-E se sastoji od 95 % zraka.



Slika 3.8 Punjenje kalupa s pjenastim polistirenom [8]

Kalupi koji se rabe gotovo su uvijek od aluminija i imaju u sebi kanale za ulaz pare i sa strane žiga i sa strane gnijezda.



Slika 3.9 Faze grijanja, hlađenja i vađenja otpjenka [8]

Također je bitno napomenuti da postoje dva osnovna načina kod praoblikovanja u trećem koraku. Naime gore prikazani način je kalupljenje u kalupe s jezgrom gotovog namjenskog proizvoda, a koristi se samo kad je riječ o velikoserijskoj proizvodnji.

Drugi i češći način kalupljenja je kalupljenje u blokovima (slika 3.10). Tu se umjesto u oblikovane kalupe zrna dovode do velikih kalupa jednostavnog oblika (gotovo uvijek pravokutnog). Iako je postupak identičan običnom kalupljenju ovo se radi zbog nekoliko razloga.

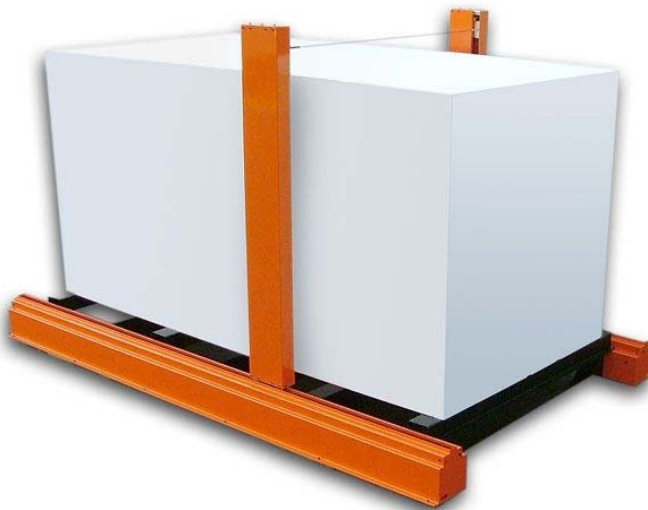


Slika 3.10 Kalupljenje u blokovima [12]

Jedan od njih je i ušteda u samoj proizvodnji PS-E, jer ovakvo kalupljenje ne zahtjeva skupu konstrukciju složenijih kalupa. Naravno ovo se tiče proizvodnje samog sirovog PS-E, jer da bi se dobio željeni oblik nakon kalupljenja u blokovima ti se blokovi dalje obrađuju strojevima za rezanje s vrućom žicom. Jasno je da je ovaj način jednostavniji za tvrtke koje se bave samom proizvodnjom pjenastog polistirena, a samim time i češći.

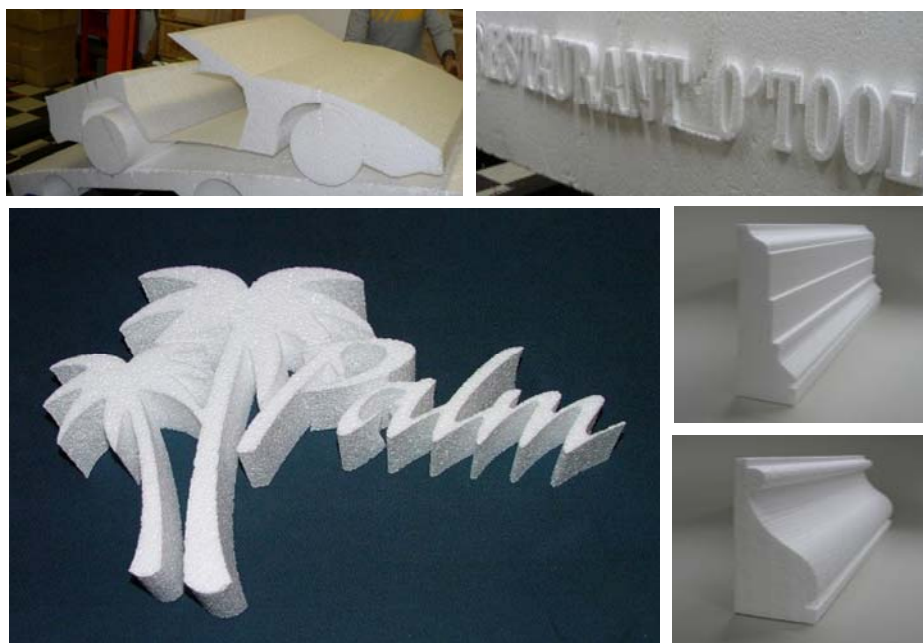
Još jedan razlog je i sam oblik otpjenaka. Ovakvi blokovi su praktični za transport do mjesta gdje se dalje režu i oblikuju.

U postrojenjima sa strojevima za rezanje vrućom žicom od tih se blokova mogu dobiti bilo kakvi oblici. Veliki dio ipak otpada na jednostavno poprečno rezanje tih blokova (slika 3.11) u svrhu dobivanja *ploča* od PS-E-a koje se dalje upotrebljavaju kao izolacija u kućama (treba napomenuti da se u ovu svrhu također koristi i ekstrudirani polistiren).



Slika 3.11 Okomito rezanje [13]

Rezanje vrućom žicom svoju preciznost i široku raznolikost pokazuje pri izradi raznih loga i kutnih lajsni, kao što je prikazano na slici 3.12.



Slika 3.12 Proizvodi dobiveni rezanjem s vrućom žicom [14]



### 3.3 Upotreba pjenastog polistirena

Pjenasti polistiren je polimer koji ima specifična svojstva zahvaljujući svojoj strukturi koja se sastoji od pojedinačnih makromolekula niske gustoće. PS-E je vrlo lagan i može izdržati teret puno puta veći od vlastite težine na vodi. Budući da makromolekule nisu sve međusobno isprepletene toplina teško putuje kroz PS-E, što ga čini izvrsnim izolatorom. [11]

Pjenasti polistiren danas se može naći u mnogim primjenama budući da spada u skupinu širokoprimjenjivih polimera. Rabi se kod plutajućih naprava, za izolaciju, a najviše se koristi kao ambalaža u prehrambenoj industriji (slika 3.13). Može ga se pronaći u svakom domu, uredu, dućanu ili kafićima. Dolazi u mnogim oblicima. Od kutije za jaja i podmetača za meso, tanjura za juhu, posuda za salatu do korištenja pri pakiranju i transportu (slika 3.14) elektroničkih uređaja.



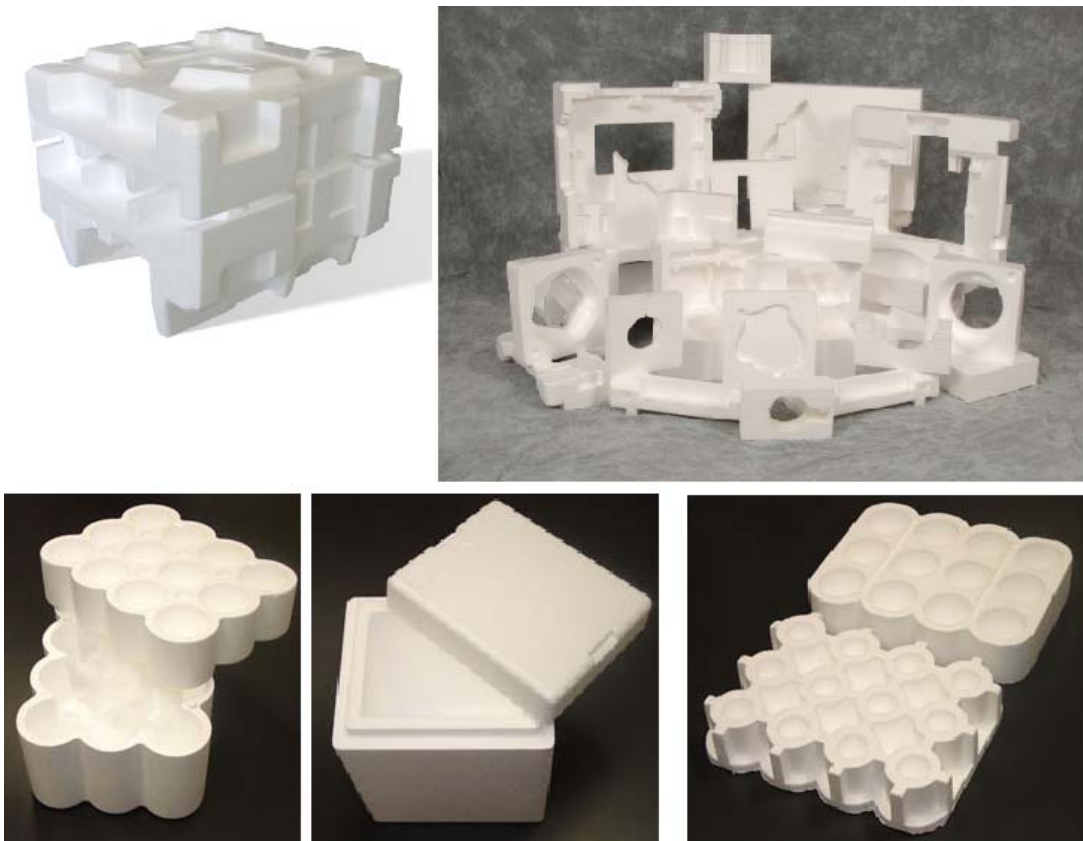
Slika 3.13 Upotreba polistirena u prehrambenoj industriji [8] [10]



Važna svojstva polistirena su:

- ✚ čuva okoliš od curenja sadržaja i zadržava oblik bez obzira na to što se u ambalaži nalazi
- ✚ toplu hranu održava toplom, a hladnu hladnom
- ✚ izolira voće, povrće i meso od okoliša te ga čini svježim dulje vrijeme
- ✚ niske je cijene i izvrstan izbor s obzirom na sanitarne uvjete
- ✚ štiti elektroničke i druge uređaje pri transportu bez utjecaja na ukupnu masu transporta.

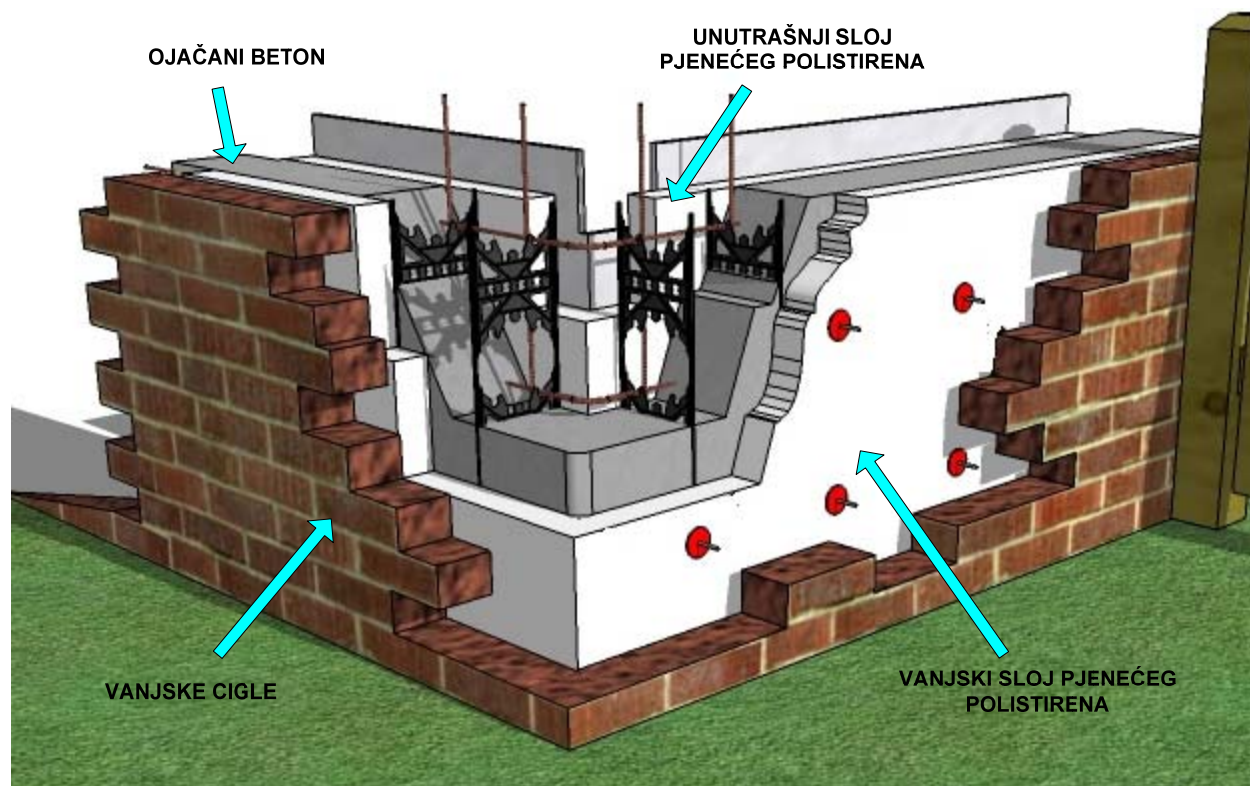
Do danas ne postoji materijal koji pruža bolju kombinaciju čvrstoće, mase i trajnosti za zaštitu predmeta, bili to računala, porculan, jutarnja kava ili ručak.



Slika 3.14 Upotreba polistirena u transportu [10]

Posebnu ulogu pjenasti polistiren ima u građevinarstvu kao konstrukcijski materijal. Primjenjuje se u velikim konstrukcijama kao što su ceste, mostovi, u velikim zgradama kao i u malim stambenim kućama.

Svojstva PS-E-a čine ga idealnim za upotrebu kao lagano punilo, izolator ili kao dekoracijski element. U gotovo svakom građevinskom području našao bi se pjenasti polistiren kako odigrava veliku ulogu u većini konstrukcija.



Slika 3.15 Upotreba PS-E-a u građevini [21]

Na slici 3.15 vidi se primjer građenja stambene zgrade koji se primjenjuje svuda po svijetu već dvadesetak godina i koji pruža izvrsna izolacijska svojstva. Istraživanja su pokazala da trenutno ne postoji bolji materijal koji bi mogao zamijeniti upotrebu PS-E-a ili koji bi mu po svojstvima mogao ikako parirati.

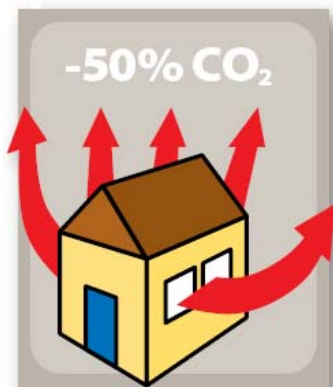
Upravo to je prikazano u tablici 3.1, u kojoj se vidi da su staklena i mineralna vuna također relativno dobri izbori za izolaciju, no kad se uzme u obzir da je i njihova proizvodnja mnogo skuplja jasno je zašto pjenasti polistiren prevladava.

Tablica 3.1 Ocjene izolacijskih materijala [22]

MATERIJAL	OCJENA
Pjenasti polistiren	A+
Staklena vuna (<160 kg/m <sup>2</sup> )	A
Mineralna vuna (<150 kg/m <sup>2</sup> )	A
Pluto (<120 kg/m <sup>2</sup> )	B
Pjeneće staklo	B
Poliuretan	B
Ekstrudirani polistiren (<40 kg/m <sup>2</sup> )	C

Još jedna bitna odlika ugrađenog pjenastog polistirena kao izolatora je sama ušteda nafte. Naime izolacija kuće PS-E-om, za čiju proizvodnju je utrošeno samo 500 l nafte, uštedi 100 000 l goriva za grijanje tijekom 50 godina. [17]

Uz to se primjenom pjenastog polistirena smanjuje emisija štetnog CO<sub>2</sub> za 50 % (slika 3.16). [23]



Slika 3.16 Smanjenje emisije CO<sub>2</sub> [23]

Za kraj je zanimljivo pogledati brojke koje su se dobile istraživanjem. Neto ušteda energije svih plastičnih izolacija (podovi, zidovi i krovovi) iznosi minimalno 9500 milijuna GJ ili: [23]

- 20 % od ukupne godišnje potrošnje energije u EU
- 800 prekoceanskih tankera (260 kt sirove nafte svaki)
- energija koja se dobije iz pogona 61 nuklearne elektrane snage 1500 MW
- energija potrebna za proizvodnju PS-E za izolaciju se uštedi unutar prva četiri mjeseca
- kroz njen čitav životni ciklus izolacija od PS-E uštedi 150 puta više energije nego što je potrošeno za njenu proizvodnju.

### 3.4 Svojstva pjenastog polistirena

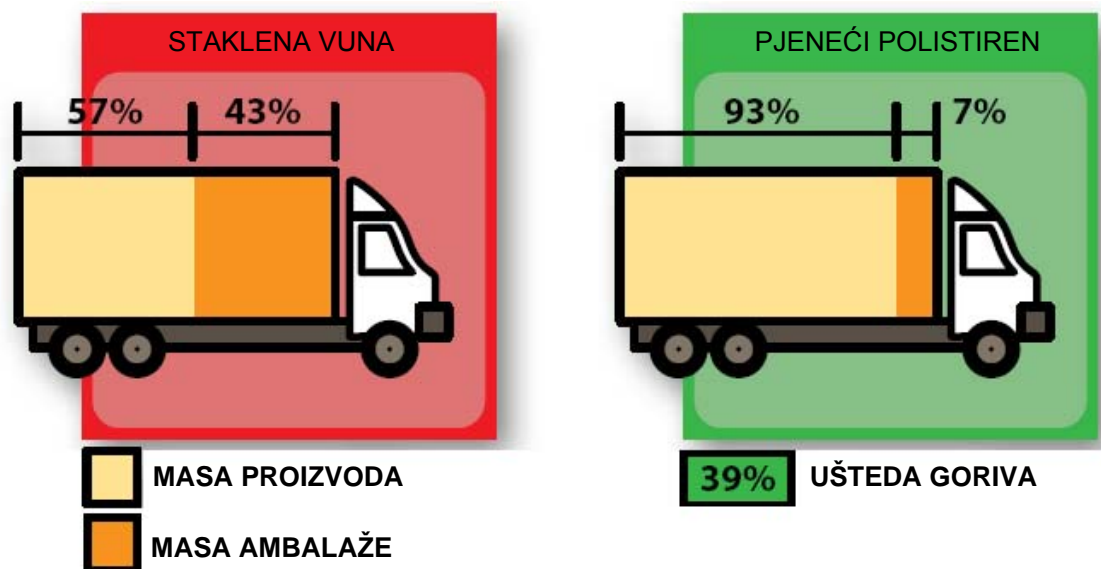
Pjenasti polistiren je u širokoj upotrebi već više od 40 godina, i to upravo zbog njegove tehničke raznolikosti, performansi i cijene. Kada se govori o njegovim svojstvima bitno je naglasiti da ona ovise o tipu pjenastog polistirena odnosno o njegovoj gustoći koja se u pravilu kreće od 12 do 30 kg/m<sup>3</sup>. U daljnjem tekstu opisana su neka najvažnija svojstva pjenastog polistirena.

#### 3.4.1 Trajnost

Struktura pjenastog polistirena čini ga dimenzijski stabilnim tijekom godina. Budući da je inertan, organski materijal, kao takav neće truliti te je vrlo postojan na plijesan.

#### 3.4.2 Masa

Budući da se PS-E sastoji od 98 % zraka, o usporedbama s ostalim konkurentnim materijalima nema govora. To ga čini izvrsnim materijalom za zaštitu uređaja kod pakiranja jer ne pridodaje puno bruto mase, a time znatno smanjuje potrošnju nafte kod transportnih vozila (slika 3.17).



Slika 3.17 Ušteda goriva [23]

### 3.4.3 Prigušenje udara

PS-E pokazuje izuzetne rezultate u prigušenju udara i vibracija, što ga čini prvim izborom za zaštitu lomljivih i elektroničkih uređaja, te raznih kemikalija pri pakiranju i transportu.

### 3.4.4 Kemijska postojanost

Pjenasti polistiren je postojan na veliki dio kiselina i alkohola. Naravno sama ta postojanost ovisi o vremenu, temperaturi i opterećenju kojem je PS-E izložen. Dugotrajnija izloženost kiselinama kod polimernih materijala obično izaziva omekšavanja i pukotine. Pjenasti polistiren ima istu kemijsku postojanost kao i polistiren opće namjene. Većina kiselina i njihovih vodenih otopina nemaju utjecaja na pjenasti polistiren, uz iznimku jako oksidirajućih kiselina.

Tablica 3.2 Kemijska postojanost [15]

OTOPINA	Postojan/nepostojan
Morska voda	postojan
Lužine	postojan
Sapunica	postojan
Natrijev hidroksid	postojan
Katran	postojan
Maziva	postojan
Alkohol	postojan
Mikroorganizmi	postojan
Nafta	djelomično postojan
Benzin	nepostojan
Oksidirajuće kiseline	nepostojan
Sumporna kiselina	nepostojan
Organske otopine	nepostojan
Zasićeni ugljikovodik	nepostojan

### 3.4.5 Postojanost na vlagu

Pjenasti polistiren je materijal sa zatvorenim ćelijama i kao takav ne upija (apsorbira) vodu, osim ako nije riječ o vrlo dugim intervalima. No i u ovim uvjetima on zadržava svoj oblik, veličinu i strukturu, dok su primjetne male promjene u svojstvima toplinske izolacije.

Kako je pokazano u tablici 3.3 postotak porasta volumena pjenastog polistirena izloženog vodi pada što je pjenasti polistiren više gustoće. 1998. je van Dorp pokazao da je volumen pjenastog polistirena izloženog vodi u trajanju od 9 do 12 godina porastao samo za 8 – 9 %.

Tablica 3.3 Porast volumena u % [15]

Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Nakon 7 dana	Nakon 1 godine
15	3	5
20	2,3	4
25	2,2	3,8
30	2	3,5
35	1,9	3,3

### 3.4.6 Zvučna izolacija

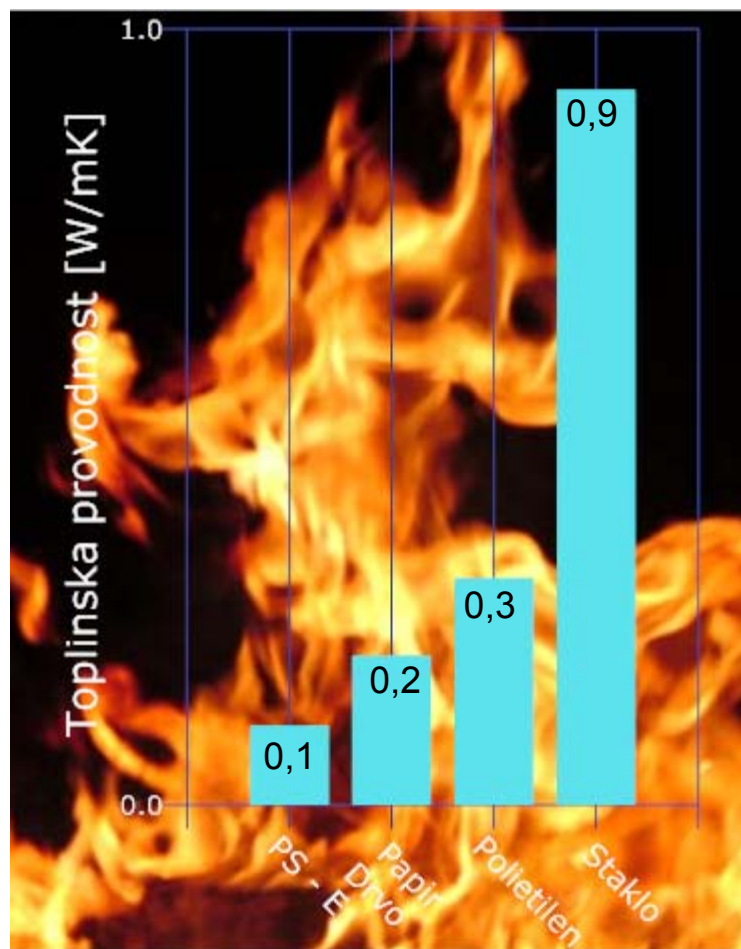
Pjenasti polistiren, kada se rabi u kombinaciji s drugim građevinskim materijalima bitno smanjuje prenošenje buke kroz zidove, podove ili plafone. Ploče od PS-E-a debljine od samo 0,625 cm već značajno izoliraju buku, i tako čine nepotrebnim upotrebu nekih izolacijskih materijala puno većih debljina, a samim time i masa.

### 3.4.7 Toplinska izolacija

Budući da se pjenasti polistiren sastoji od 98 % zraka i 2 % polistirena, a zrak je loš vodič topline, jasno je da pjenasti polistiren ima izvrsna toplinska izolacijska svojstva.

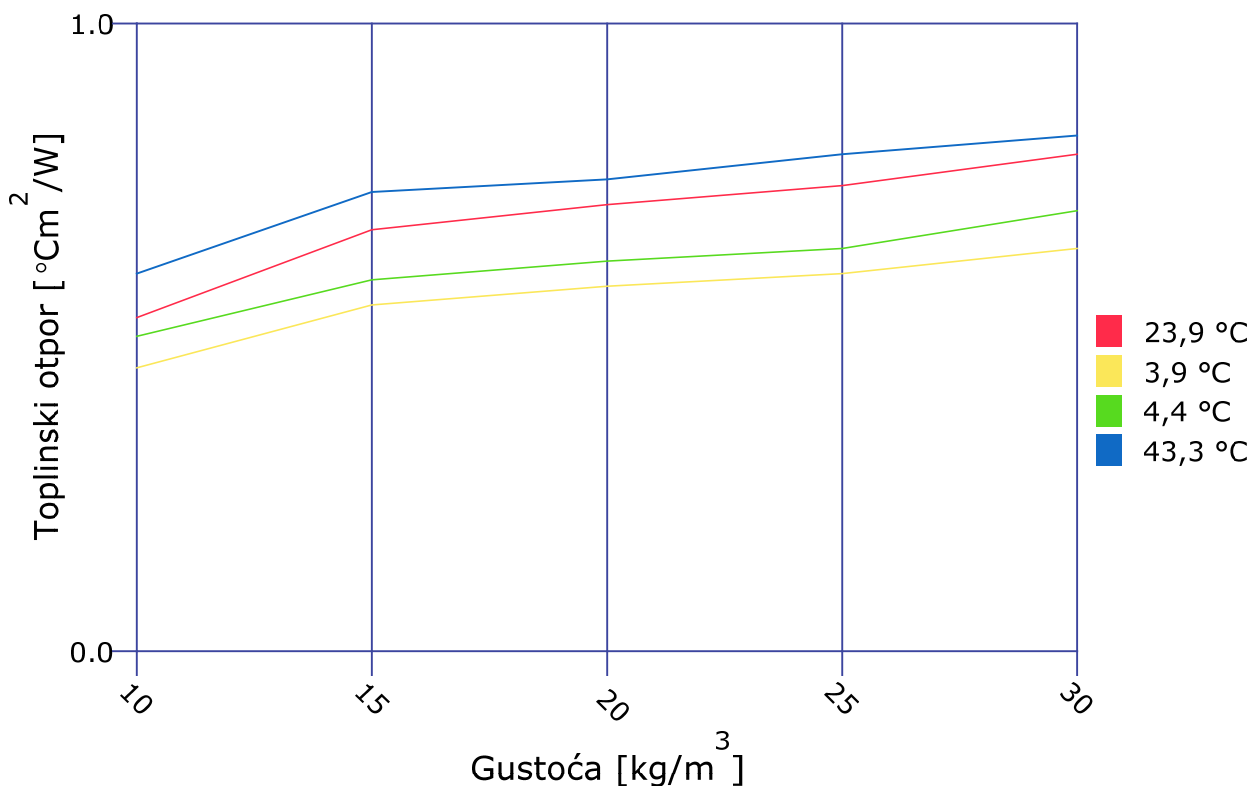
Toplinski otpor ( $R$ ) koji pokazuje koliko je neki materijal postojan na toplinu, u slučajevima zemlje i betona pokazuje vrijednosti ispod  $0,1 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ , dok se kod PS-E-a vrijednosti kreću najčešće između  $0,5 - 0,8 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ , što je puno viša vrijednost od gore navedenih materijala.

Na slici 3.18 je prikazana usporedba toplinske provodnosti nekoliko materijala s pjenastim polistirenom.



Slika 3.18 Toplinska provodnost [23]

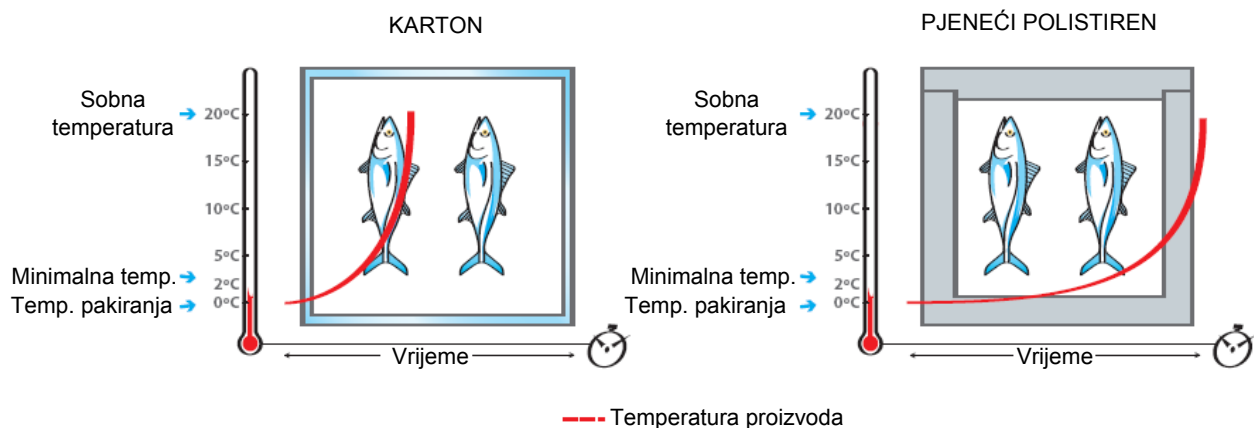
Dijagram 3.19 pokazuje ovisnost toplinskog otpora o gustoći PS-E-a i izloženoj temperaturi. Primjetno je da se toplinski otpor povećava što je viša gustoća PS-E-a, a smanjuje kad je riječ o višim temperaturama.



Slika 3.19 Ovisnost toplinskog otpora o temperaturi i gustoći [15]

Zbog svega navedenoga jasno je zašto je PS-E toliko primjenjivan materijal u građevinarstvu pri ugradnji u podove i zidove, ili u transportu i pakiranju prehrambenih proizvoda. Njegova toplinska svojstva omogućuju dulje držanje hrane u ambalaži, a samim time i transport hrane na veće udaljenosti (slika 3.20).

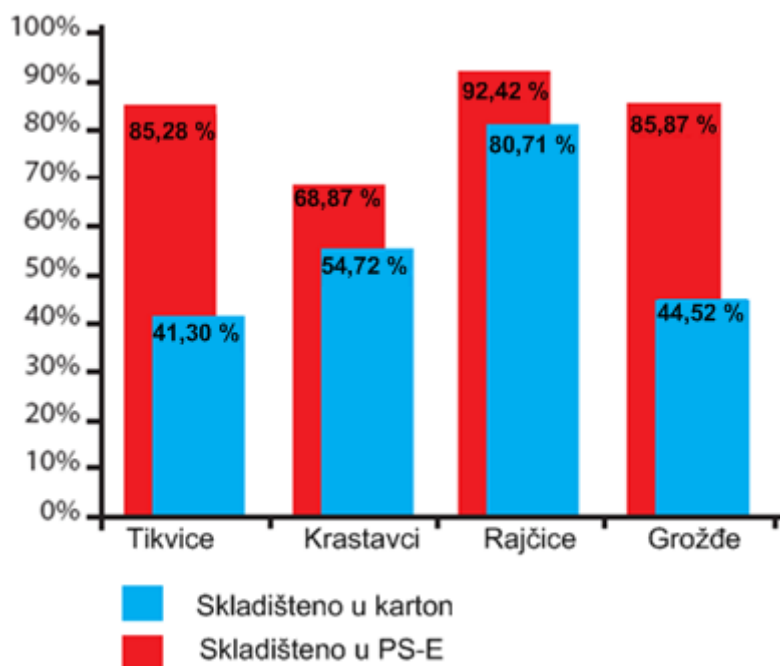




Slika 3.20 Usporedba ambalaže od PS-E-a i kartona [23]

PS-E ne samo da bolje zadržava toplinu je i dokazano je da je PS-E najbolji materijal za održavanje kalorijskih vrijednosti i vitamina kod hrane. [23]

Na slici 3.21 vidi se usporedba očuvanja vrijednosti C vitamina kod kartona i pjenastog polistirena.



Slika 3.21 Očuvanje vrijednosti vitamina C [23]

## 4. OPORABA PJENASTOG POLISTIRENA

### 4.1 Općenito

U industriji i svakodnevnom životu ljudi kroz stoljeća dolazi do svakodnevnih promjena, nabolje ili nagore. Kroz sve te godine i promjene samo jedna činjenica je konstantna. Činjenica da čovjek svim i bilo kojim svakodnevnim postupcima (bilo u poslu ili slobodnom vremenu) utječe na okoliš.

Kako se svijet razvijao to je postajalo sve očitije i iako je u prvom poglavlju spomenuto da čovječanstvo reciklira već tisućama godina, to nikad nije bilo potrebnije nego u posljednjih pola stoljeća. Naime čovjek je u svom tom, ponekad nekonvencionalnom i nerazboritom razvoju potpuno (ili gotovo potpuno) zaboravio na Zemlju.

Otpad se gomilao i stanje se pogoršavalo do današnjeg stanja u kojem ljudi pokušavaju pronaći načine za uporabu svih iskorištenih sirovina. Naravno ne može se reći da se stanje godinama pogoršava samo zato što ljude nije briga, ili stoga što je svijest o očuvanju okoliša vrlo niska. Činjenica je da se od kraja 19. stoljeća do danas stanovništvo Zemlje povećalo za gotovo četiri puta, a samim time porasla je i potrošnja sirovina i energije. Po nekim istraživanjima broj stanovnika će do 2050. godine narasti od sadašnjih 6,7 milijardi na 9,5 milijardi. Te brojke govore da bi otpad koji bi toliki broj ljudi ostavljao iza sebe doveo do potpunog *zatrpavanja*, i stoga nije čudno da je upravo pitanje uporabe jedno od najbitnijih pitanja današnjice uopće.

Kroz povijest gospodarenja otpadom razvila su se četiri osnovna načina njegovog zbrinjavanja:

- a) Odlaganje
- b) Spaljivanje
- c) Recikliranje
- d) Smanjenje potrošnje resursa

O gospodarenju otpadom u Republici Hrvatskoj jedva da se donedavno moglo govoriti, o čemu svjedoči više tisuća smetlišta koja treba sanirati, a novonastalim otpadom treba nastojati razumno gospodariti. [17]

Postoje četiri osnovna načina da se smanji otpadni materijal od pjenastog polistirena:

- 1) SMANJENJE – odnosi se na smanjenje iskorištavanja prirodnih resursa. Optimiziranjem dizajna, konstruktori kalupa mogu smanjiti potrošnju PS-E-a, i tako smanjiti *teret* za okoliš i samu cijenu proizvodnje.
- 2) PONOVDNA UPORABA – polistiren za transport može i morao bi biti više puta upotrebljavan, bilo za transport istih ili sličnih stvari ili ga se može razrezati, usitniti i kao takvog koristiti za drenažu i *aerizaciju* zemlje.
- 3) RECIKLIRANJE – proces obnove PS-E-a u svrhu proizvodnje novih materijala, kao što su umjetno drvo namijenjeno za izradu vrtnog namještaja ili novih plastičnih proizvoda kao što su vješalice ili CD kutije.
- 4) NOVI OBLIK ENERGIJE – pjenasti polistiren ima vrlo visoku ogrjevnu vrijednost (višu i od ugljena), i može biti sigurno spaljen radi dobivanja energije bez ispuštanja toksičnih para.

U svakom slučaju najnekorisniji način rješavanja otpada od PS-E-a je bez sumnje njegovo zatrpavanje zemljom na odlagalištima širom svijeta, zato što predstavlja promašenu priliku za obnovom vrijedne sirovine. No, ipak je to često slučaj upravo zbog toga što je PS-E inertan, netoksičan, bezmirisan i nerazgradiv i kao takav savršen materijal za takve otpadne lokacije koje nisu namijenjene za stvaranje komposta nego da se jednostavno napuste kad se napune.

Širom svijeta velik dio pjenastog polistirena iskorištava se za dugotrajne primjene kao što je slučaj kod građevinskih izolacija (također i ekstrudirani polistiren), i budući da se sve više ostalog PS-E-a reciklira, sve je manji postotak PS-E-a koji završava na smetlištima.

## 4.2 Životni ciklus pjenastog polistirena

S motrišta zaštite okoliša povoljna je ona tvorevina koja tijekom proizvodnje, uporabe i konačnog odlaganja njezina preostatka najmanje opterećuje, tj. stvara najmanje plinovitog, kapljevog i čvrstog otpada, te koja troši najmanje sirovina i energije. Analize koje uključuju i vrednuju sve faze životnog ciklusa tvorevine (*eng. Life Cycle Analysis, LCA*) često daju drugačiju sliku neke tvorevine u odnosu na one načinjene od drugih materijala. No, LCA se sve češće rabi i za razumijevanje raznih mogućnosti gospodarenja otpadom, pri čemu treba uvijek voditi računa o svim vrstama otpada, a ne samo čvrstom otpadu preostalom nakon uporabe tvorevina. Takva procjena obuhvaća sve utjecaje na okoliš i na resurse različitih postupaka uporabe otpada, kao i procese na koje utječu pojedine opcije uporabe otpada (različiti načini sakupljanja otpada za uporabu, transport i sl.). [17]

Na slici 4.1 prikazan je životni ciklus pjenastog polistirena od prvih zrna stirena preko proizvoda pjenastog polistirena do novih proizvoda nakon uporabe.



Slika 4.1 Životni ciklus pjenastog polistirena (LCA) [18]

### 4.3 Problemi recikliranja pjenastog polistirena

Budući da u industriji kao i svakodnevnom životu ništa nije tako jednostvano, ni ekološka svijest ne čini razliku. Ta novonastala svijest o zaštiti okoliša sa sobom povlači i dosta negativnih stvari. Naime ljudi sada na plastiku gledaju kao na *loš* materijal, onečišćivač koji uz svoje očite prednosti donosi puno više nedostataka koji se tiču onečišćenja okoliša i ljudskog zdravlja. Zadnjih godina čitava plastičarska industrija polimera je pod povećalom i prati se svaki njen korak. Veliki dio znanstvenika svakog dana pronalazi, ili pokušava pronaći nove razloge zašto treba smanjiti ili potpuno uništiti proizvodnju određenih polimera, među kojima polistiren ima mjesto u prvom redu.

Iako je većina *optužbi* protiv polimera, a samim time i polistirena prevelika i preuveličana, zadatak svakog plastičara je da ispita sve prednosti i nedostatke polimera, te da provjeri koliko istine ima u tim optužbama.

Kada se govori o nedostacima pjenastog polistirena, tu se u prvom redu spominju tri osnovna problema:

- 1) Odnos mase i volumena, odnosno gomilanje otpada.
- 2) Potrošnja nafte za proizvodnju.
- 3) Štetnost za okoliš i zdravlje.

Iako su ti razlozi gotovo identični za sve polimere i povlače se već godinama, za svaki njihov argument *protiv* postoji bar dvostruko više argumenata *za*, treći problem, odnosno problem štete za okoliš i poglavito zdravlja je glavna točka polaznica svih protivnika polistirena.

#### 4.3.1 Odnos mase i volumena, gomilanje otpada

U tekstu je već obrađen omjer mase i volumena pjenastog polistirena, te su naglašene prednosti i nedostaci tog omjera.



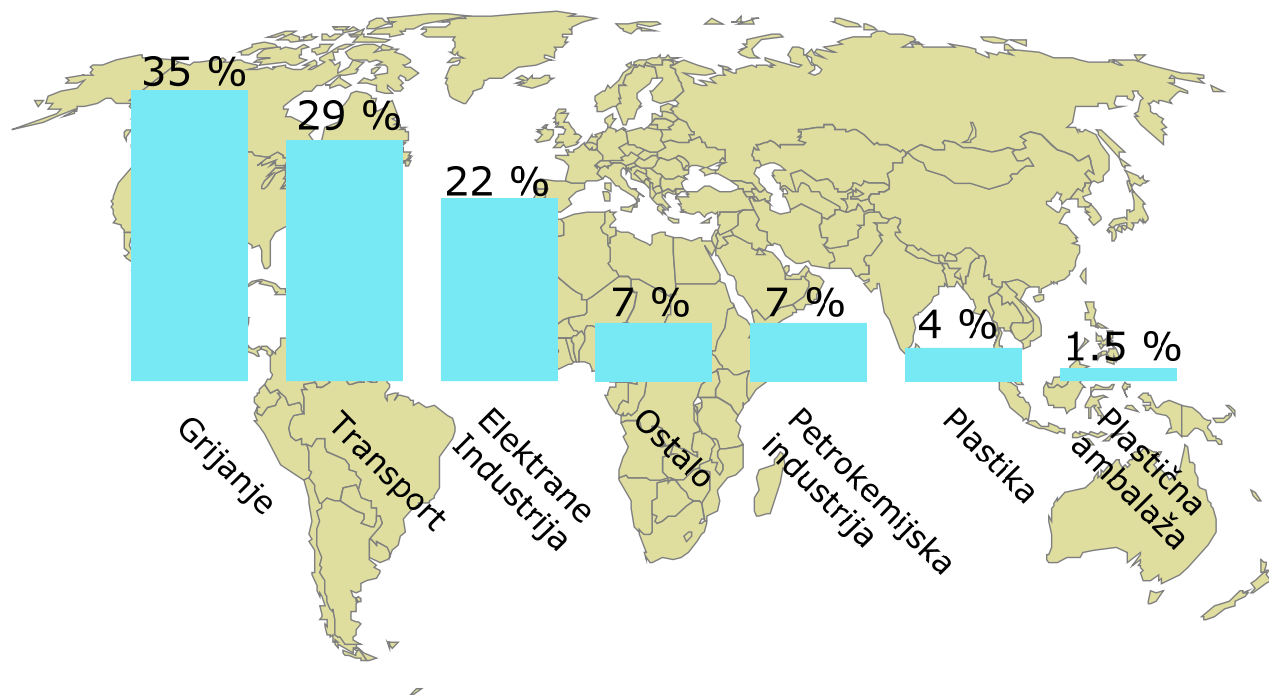
Slika 4.2 Omjer mase i volumena [20]

Što se tiče pjenastog polistirena, ovaj problem je izgubio na važnosti u proteklih nekoliko godina kada su izumljeni novi način taljenja i komprimiranja PS-E-a. Veliki volumen pjenastog polistirena danas se može smanjiti u nekad nezamislivim omjerima i taj je problem danas aktivan samo u neupućenim krugovima.

S najnovijim postupcima kao što je *Styromelt* koji predstavlja posljednju riječ na polju uporabe pjenastog polistirena volumen se može smanjiti za 95 % i tako znatno smanjiti troškove.

#### 4.3.2 Potrošnja nafte za proizvodnju [17]

Glavne sirovine za proizvodnju plastike i gume su nafta i plin, a budući da je riječ o neobnovljivim sirovinama to im je i jedan od glavnih prigovora. No, za proizvodnju plastičnih materijala troši se samo oko 4 % ukupne količine nafte, a omjer vrijednosti sirovine i plastične tvorevine često je čak 1 : 200. Oko 96 % ukupne količine nafte troši se u druge svrhe, pretežno za potrebe izgaranja uz relativno nisku iskoristivost. To se odražava i na emisiju CO<sub>2</sub>, utjecaj na klimu, ali i na potrebnu energiju. Primjerice, gotovo tisućinka potrebnih količina nafte dopijeva na različite načine u more, a to iznosi oko pet milijuna tona.



Slika 4.3 Potrošnja nafte po područjima [17]

Među više od 50 različitih vrsta plastičnih materijala koji se danas proizvode, glavninu, preko 95 % čini njih sedam: polietilen niske i linearni polietilen niske gustoće (PE-LD i PE-LLD), polietilen visoke gustoće (PE-HD), poli(vinil-klorid) (PVC), polipropilen (PP), polistiren (PS) te poli(etilen-tereftalat) (PET).



### 4.3.3 Štetnost na okoliš i zdravlje

Kao što je napomenuto, najveći razlog borbe protiv pjenastog polistirena je upravo njegova štetnost na zdravlje i okoliš tijekom proizvodnje. Ovu činjenicu nije zanemarila niti plastičarska industrija, tako da je danas izloženost stirenu na radnim mjestima zaista minimalna i daleko od opasnih količina. U daljnjem tekstu prikazana su neka mjerenja i vrijednosti koje se odnose na SAD u 2005. godini. Procjene su da su vrijednosti nešto više u Aziji, a niže u Europi.

Četiri su osnovna načina izlaganja stirenu: zrakom, vodom i hranom.

#### 4.3.3.1 Zrak [24]

Osnovni način na koji čovjek može biti izložen stirenu je udisanjem. Oslobođanje stirena potječe od:

- industrije koje ga koriste ili proizvode
- ispuha automobila
- dima cigareta
- stroj za fotokopiranje.

Logično je da je postotak sadržaja stirena u zraku viši u većim gradovima nego u ruralnim mjestima. Isto tako viši je udio u zatvorenim prostorijama nego otvorenim:

- 0,06 – 4,6 ppb (djelića na milijardu, *eng. parts per billion*) u otvorenom prostoru
- 0,023 – 11,5 ppb u zatvorenom prostoru.

Procijenjeno je da je u atmosferu ispušteno ~ 23 000 tona stirena (približno 93 % od ukupne količine stirena ispuštenog 2005. u SAD), najviše od strane industrije (ne samo plastičarske) i automobilske ispuha. Izmjereno je ispuštanje stirena u razinama od 6,2 do 7,0 mg/km (miligrama po prijađenom kilometru) za vozila sa benzinskim motorom i od 1,4 – 2,1 mg/km za vozila s dizel motorom. Također je zabilježena emisija stirena nastala spaljivanjem otpada i drva.

#### *4.3.3.2 Voda i zemlja [24]*

Mali udio stirena može se pronaći u zemlji ili vodi za piće. Izloženost se može postići pijenjem takve vode ili pranjem u njoj preko kože.

Procijenjeno je da je u vodu ispušteno ~ 2,2 tone stirena odnosno oko 0,01 % ukupnog postotka stirena ispuštenog u okoliš, a u zemlju ~ 1 000 tona što čini oko 4,1 % od ukupnog stirena u okolišu. Također treba ubrojiti još i ~ 444 tone stirena (oko 1,8 %) u zemlji koji je ušao podzemnim putem.

#### *4.3.3.3 Zrak u radnom prostoru [24]*

Veliki dio radnika svakodnevno je potencijalno izložen udisanju stirena. Naravno najvećoj opasnosti izloženi su radnici u plastičarskoj industriji koji mogu biti izloženi ne samo udisanjem nego i neposrednim dodirom kože.

#### *4.3.3.4 Hrana [24]*

Nizak udio stirena može se naći u nekoj hrani kao što su neka voća, povrća, pića ili meso. Dokazano je da se također mali udijeli stirena mogu prenijeti sa ambalaže od PS-E-a na hranu koja je u njoj zapakirana.

#### 4.3.3.5 Štetnost PS-E-a na zdravlje i okoliš

Polistiren je napravljen od stirena, koji je poznati ljudski neurotoksin i poznati životinjski karcinogen. Na radnicima koji rade sa stirenom u tvornicama dokumentirani su razni neurološki i krvni problemi. Stiren ne samo da ostaje u proizvodnji, nego je pokazano da *curi* iz ambalaže od pjenastog polistirena u određenim uvjetima. Od njih najprimjetniji je slučaj kada je PS-E u dodiru s limunskom kiselinom (kada se u čaši od PS-E pije čaj i dodaje limun), ili u slučaju zagrijavanja hrane s vitaminom A (koji razlaže PS-E) u mikrovalnoj pećnici. [19]

U zadnjih 30 godina znanstvenici su postali svjesniji prisutnosti stirena u našim tijelu. Tragovi stirena su pronađeni u masti, krvi, pa čak i u majčinu mlijeku. [19]

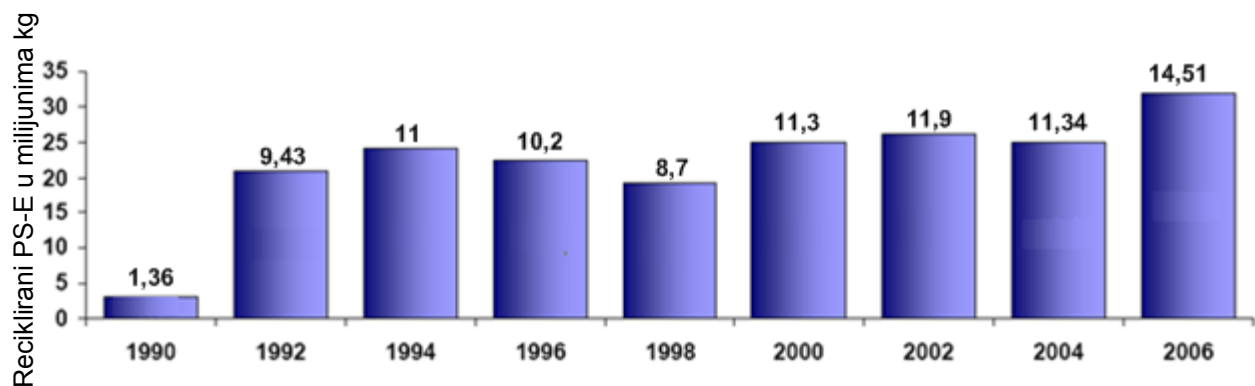
#### 4.4 Kratka povijest recikliranja pjenastog polistirena

Godine 1988. stvorio se veliki pritisak na industriju polistirena da reciklira svoje najmasovnije proizvode – ambalažu za namirnice, iako masa svih proizvedenih kutija, kašeta ili čaša predstavlja 1 % od ukupne mase koja se nalazi na odlagalištima. Nastao je značajan pritisak javnosti da se ili sagrade velika postrojenja za recikliranje PS-E-a ili da se potpuno ukine njegova proizvodnja, bez obzira na to što ostali materijali korišteni u iste svrhe (karton ili aluminij) nisu bili izloženi nikakvim kritikama, iako se i pri njihovoj proizvodnji mogu pronaći određene nepogodnosti. [25]

Recikliranje pjenastog polistirena nije bilo previše uspješno sa ekonomske strane, a za to je postojalo više razloga. Glavni su razlozi bili svojstva polistirena, kao što je već spomenuti odnos mase i volumena. Budući da je tada bilo još malo postrojenja za recikliranje polistirena, njegov transport na velike udaljenosti nije bio nimalo isplativ. Industrija je shvatila da PS-E mora prvo biti sprešan da bi mu se volumen značajno smanjio te da bi se njegov transport isplatio. [25]

Unatoč svemu tome uporaba polistirena se nastavila razvijati i u roku od 10 godina dostigla vrijednosti od 0 kilograma na godinu do ~ 11 000 tona na godinu u 2001. godini samo u SAD-u. [25]

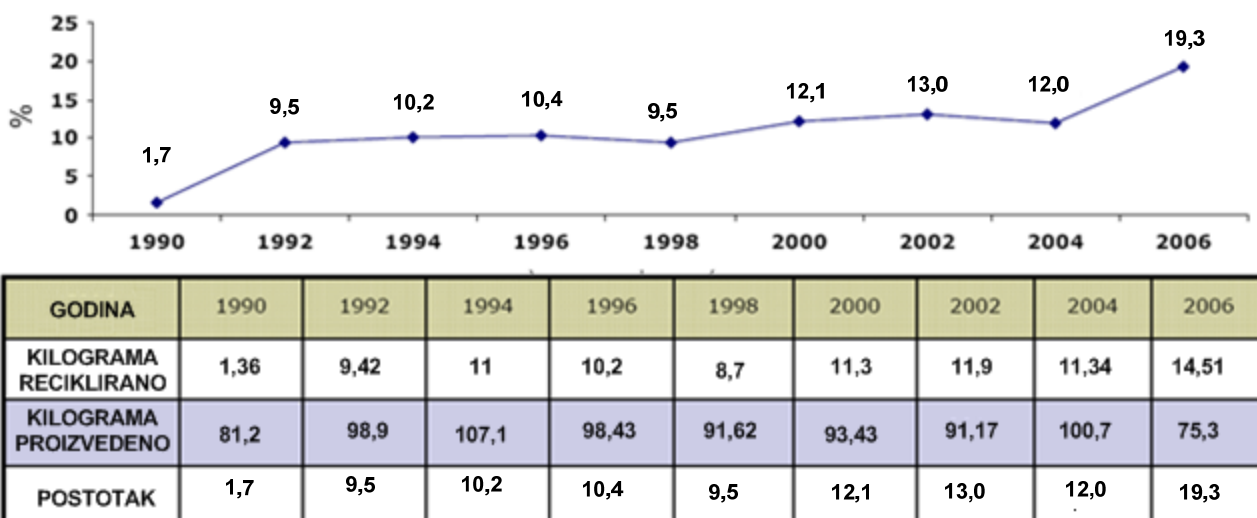
Na slici 4.4 prikazana je količina recikliranog pjenastog polistirena u SAD-u kroz godine. Lako se primijeti da se količina recikliranog PS-E-a svake godine povećava.



Slika 4.4 Količina recikliranog PS-E-a po godinama [31]

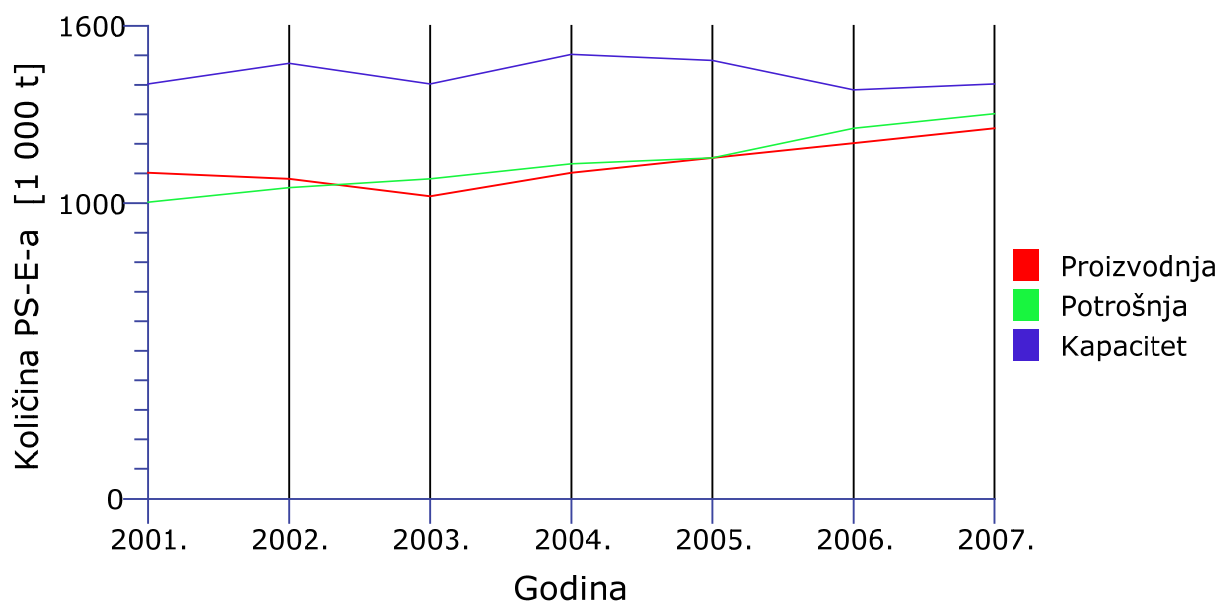
Istraživanje koje vrijedi za slike 4.4 i 4.5 provedeno je na 70 tvrtki koje se bave proizvodnjom i recikliranjem pjenastog polistirena u 25 država širom Amerike. Dobivene brojke ne predstavljaju pravu količinu proizvedenog i recikliranog polistirena već služe da pokažu kojom se brzinom razvija industrija polistirena.

Iz slike 4.5 vidljivo je da se količina recikliranog pjenastog polistirena (također u milijunima kilograma) u odnosu na proizvedene količine svake godine izuzev 1998. povećala, da bi godine 2006. taj odnos skočio za čak 7 %, te se procjenjuje da se danas reciklira približno 25 % svog proizvedenog PS-E-a (napomena: ove brojke odnose se na Sjedinjene Američke Države).



Slika 4.5 Postotak recikliranog u odnosu na proizvedeni PS-E [31]

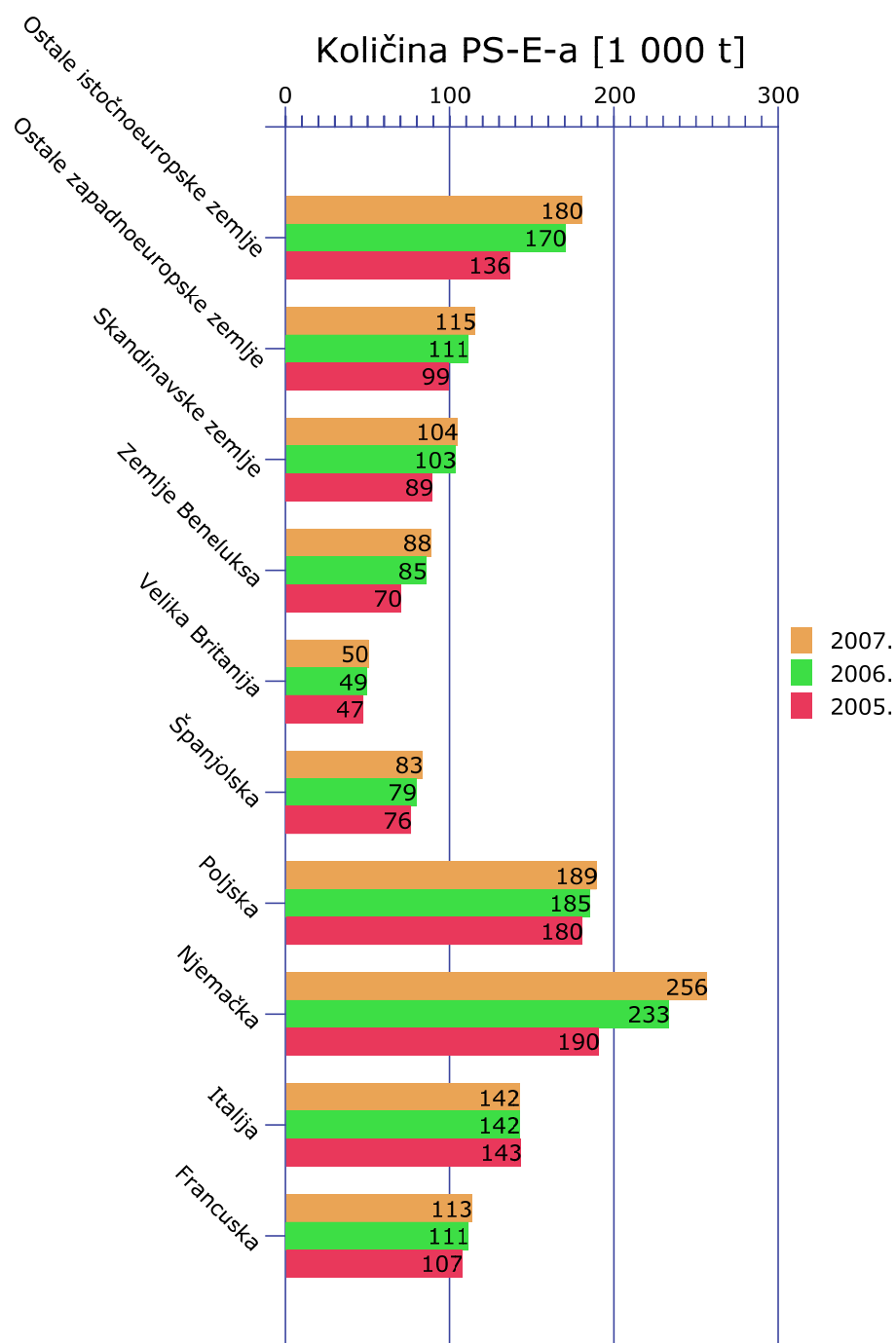
Kad se govori o pravim količinama proizvedenog polistirena, brojke su puno veće. Od ukupno u svijetu potrošenih oko 205 milijuna tona plastomera, oko 8 % ili približno 16,5 milijuna tona odnosi se na različite tipove polistirena. Od toga je oko 3,2 milijuna tona potrošeno u Europi. Ukupno je u 2006. u međunarodnoj trgovini zabilježeno gotovo 6 milijuna tona različitih tipova polistirena. [32]



Slika 4.6 Proizvodnja, potrošnja i kapacitet PS-E-a [32]

Slika 4.6 prikazuje kretanje proizvodnje i potrošnje PS-E-a te kapaciteta za njegovu proizvodnju u Europi u razdoblju 2001. – 2007. (u 2007. je potrošeno oko 1,32 milijuna tona PS-E-a, proizvedeno oko 1,246 milijuna tona, dok je europski kapacitet za proizvodnju PS-E-a 1,4 milijuna tona). [32]

Slika 4.7 prikazuje kretanje potrošnje PS-E-a u pojedinim europskim zemljama i regijama u razdoblju 2005. – 2007.



Slika 4.7 Potrošnja PS-E-a u Europi [32]

#### 4.5 Isplativost recikliranja PS-E-a [25]

Ekonomičnost je veliki, vjerojatno i glavni faktor pri određivanju uspjeha ili neuspjeha recikliranja svih materijala a ne samo polistirena. Recikliranju se pristupa nakon što je materijal za recikliranje

sakupljen, odvojen, prerađen i kada se za novonastale proizvode nađe tržište. Sam iskorišteni PS-E se ne treba smatrati kao otpad, nego kao sirovinu koju industrija može dalje iskoristiti za proizvodnju novih proizvoda. Konačni uspjeh recikliranja ovisi o stabilnom tržištu za taj materijal. Bez tržišta koje će novi proizvod potrošiti recikliranje nema smisla i često se sakupljeni i reciklirani materijal mora odlagati na odlagališima ili paliti.

Jedan od osnovnih zakona ekonomije je zakon ponude i potražnje. Jednostavno rečeno kada je potražnja za nečim veća od ponude, cijena proizvoda raste. Obrnuto, kad je ponuda veća od potražnje, cijena proizvoda pada. Ovo načelo izvrsno opisuje situaciju s recikliranim materijalima, pa tako i s pjenastim polistirenom. Tržište koje otkupljuje reciklirani polistiren u svrhu proizvodnje određenih proizvoda također kupuje i materijal koji nije prošao postupak recikliranja. Prema tome, tvrtke koje recikliraju polistiren vode utrk u dobavljačima izvornog polistirena. Šanse za reciklirani PS-E su tim manje dijelom i zbog toga što ima slabija svojstva, kao i svaki jednom reciklirani materijal.

Dakle, dok je tržište, cijena koja se dobiva za reciklirani pjenasti polistiren uvijek će biti viša ili u najgorem slučaju jednaka onoj potrebnoj za njegovo sakupljanje, odvajanje i recikliranje.

Danas recikliranje ambalaže za hranu od PS-E-a još nije ekonomski isplativo. To ne znači da se ono ne provodi, no tvrtkama koje se na to odlučuju to nije jedini izvor zarade, već recikliranje provode kao *usputni* posao. Primjerice, uspjeh recikliranja kartona ne počiva na recikliranju ambalaže za hranu, nego na kutijama za pakiranje uređaja i tvrdog uredskog papira.

Recikliranje pjenastog polistirena se isto kao i kod svih drugih materijala odvija samo kad je ono ekonomski isplativo. U primjeru pjenastog polistirena to je ambalaža za pakiranje elektronskih i drugih uređaja ili PS-E za izolaciju.

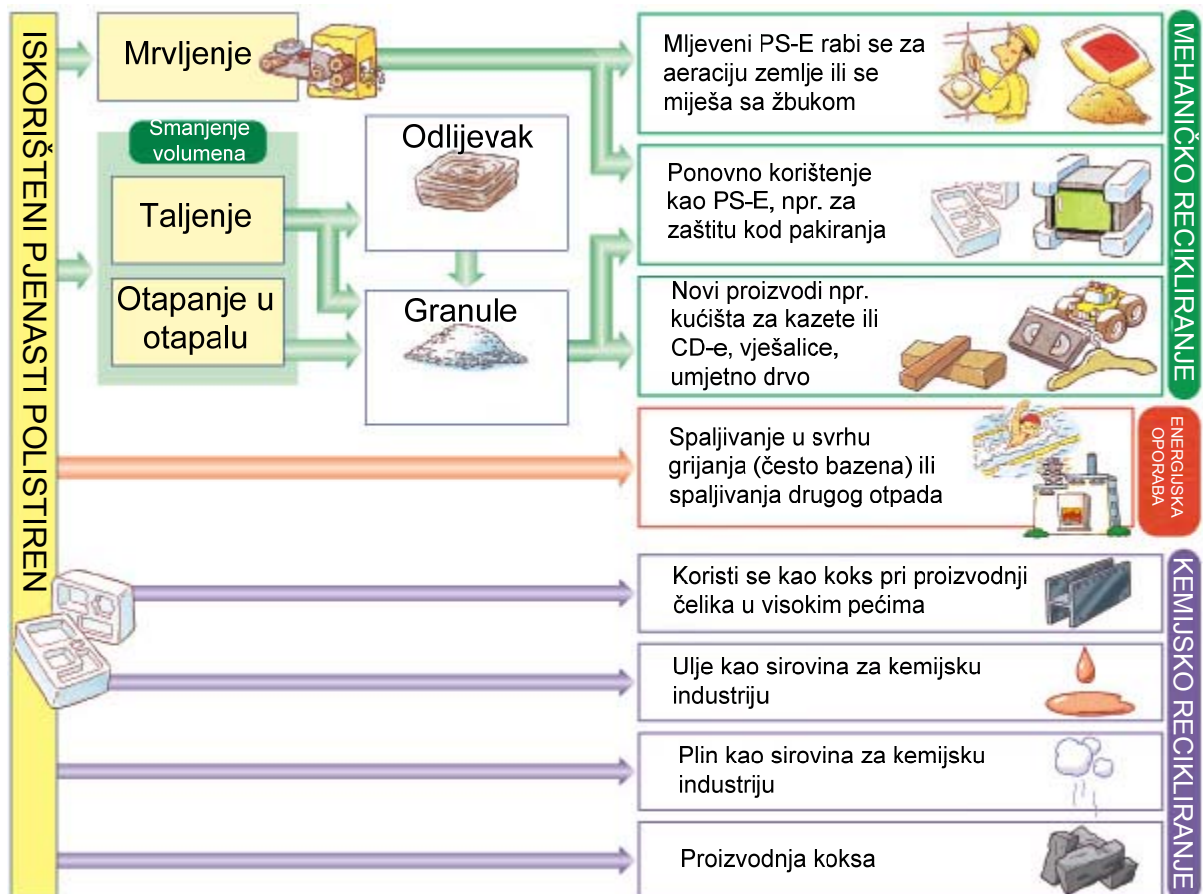
U skoroj budućnosti stvari se neće mijenjati što se tiče recikliranja ambalaže za hranu od PS-E-a, zato što u poslu brojke znače više od emocija. Tvrtke za recikliranje moraju ostvariti profit da bi uopće postojale.



#### 4.6 Postupci oporabe pjenastog polistirena

Kada se govori o uporabi pjenastog polistirena govori se o tri vrste oporabe koje su prikazane na slici 4.8:

- MEHANIČKO RECIKLIRANJE – u svrhu izrade drugih proizvoda
- ENERGIJSKA OPORABA– spaljivanjem se dobiva toplinska energija pomoću koje se može i najčešće se pali drugi otpad na odlagalištima širom svijeta, a rijede rabi u svrhu stambenog grijanja ili grijanja bazena
- KEMIJSKO RECIKLIRANJE – u svrhu dobivanja koksa ili sirove nafte i plinova u kemijskoj industriji



Slika 4.8 Tri vrste recikliranja [27]

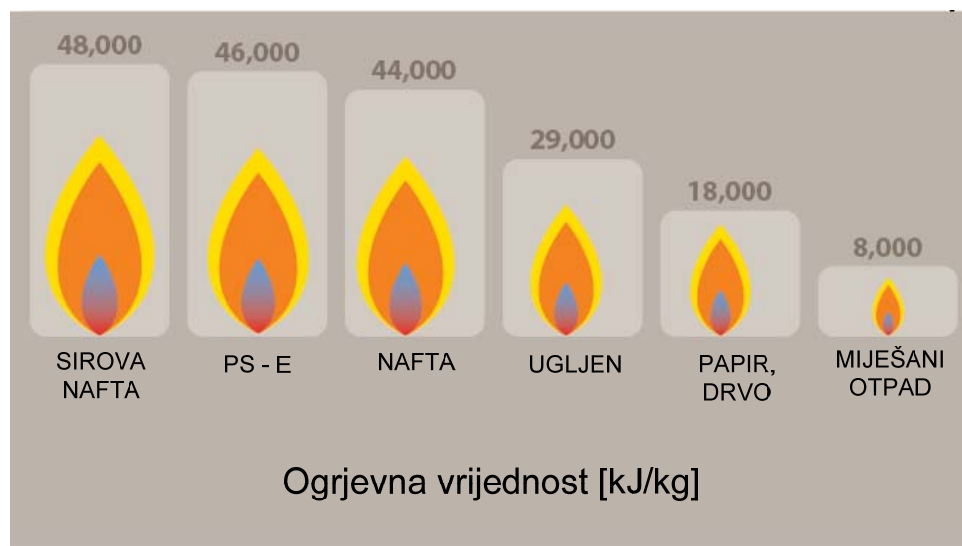
#### 4.6.1 Energijska uporaba (spaljivanje pjenastog polistirena)

Ovaj postupak uporabe pjenastog polistirena može se nazvat i *povrat* energije. Naime veliki dio energije koji je utrošen za izradu proizvoda od PS-E-a, na ovaj se način može vratiti u obliku toplinske energije.

Za *kontaminirani* otpad, kao što je ambalaža za hranu od PS-E-a, postupak spaljivanja predstavlja siguran i logičan izbor dobivanja vrijednosti od već otpisanog materijala. [26]

Izgaranje PS-E-a u spalionicama za stvaranje energije ne stvara nikakve štetne plinove. Emisije stvorene izgaranjem pažljivo su kontrolirane. Čitava industrija plastike je podržala ovaj oblik recikliranja pjenastog polistirena kao siguran i zdrav za okoliš. U modernim spalionicama PS-E otpušta većinu energije u obliku topline, često konstruirano tako da pomaže pri spaljivanju ostalog otpada, dok ostatak emisije otpada na vodu, ugljikov dioksid i sitne tragove netoksičnog pepela. [26]

Ogrjevna vrijednost pjenastog polistirena (~ 45 MJ/kg, dok drvo ima otprilike 16 MJ/kg) je viša i od nafte (slika 4.9) što znači da PS-E sam pomaže izgaranju te osigurava vrijedan izvor energije u spalionicama. Može se reći da pjenasti polistiren *posuđuje* energiju od nafte od koje se i dobiva i onda je nakon što više nije upotrebljiv *vraća* pri spaljivanju. [26]



Slika 4.9 Ogrjevna moć [23]

Ako je pravilno spaljen, od jedne tone pjenastog polistirena dobit će se samo 5,67 grama pepela, dok za papir ta vrijednost iznosi ~ 90 kg. Isto tako ako se spali bez dovoljne prisutnosti kisika ili pri nižim temperaturama (obična vatra) od pjenastog polistirena mogu se dobiti neželjene i toksične tvari i plinovi. [9]

#### **4.6.2 Kemijsko recikliranje**

Kemijsko recikliranje podrazumijeva sve postupke koji tijekom uporabe iskorištavaju svojstva plastike i gume, pri čemu osim promjene oblika i funkcije primarnog proizvoda, dolazi do promjene njihove molekulne strukture. [17]

Postupak kemijskog recikliranja je najnepovoljniji način uporabe pjenastog polistirena i kao takav primjenjuje se samo na nekoliko mjesta u cijelom svijetu. Sam postupak je relativno jednostavan, no rijetko se primjenjuje iz razloga što su dobivene sirovine i same po sebi jeftine i lako nabavljive na tržištu te nema potrebe za njihovom dodatnom proizvodnjom putem uporabe PS-E-a. Najčešće se rabi da bi dobili ulja čiji je glavni sastojak stiren, a rjeđe koks, dok se proizvodnja plinova iz pjenastog polistirena svodi samo na teoriju i gotovo se nikad ne provodi u praksi.

Postupkom kemijskog recikliranja struktura polistirena se mijenja, ali na taj način da novonastala kemikalija može biti ponovo korištena za proizvodnju PS-E-a. Takav postupak uključuje uporabu monomera i trenutno na svijetu postoji nekoliko tehnika kemijskog recikliranja. [10]

##### **4.6.2.1 Piroliza**

Pod pirolizom se razumijeva toplinska razgradnja materijala pri povišenim temperaturama bez prisutnosti zraka.

Reakcije pirolize mogu se, ovisno o različitim područjima, podijeliti na [17]:

- niskotemperaturnu pirolizu ili bubrenje (do 500 °C)
- srednjotemperaturnu pirolizu (500 – 800 °C)
- visokotemperaturnu pirolizu (iznad 800 °C)

### Laboratorijsko ispitivanje postupka pirolize na pjenastom polistirenu [39]

Ispitivanje je provedeno na polistirenu opće namjene i pjenastom polistirenu, dok su kao katalizatori korišteni BaO (barijev oksid) čistoće 97 % i FCC (fluorougljik). Ispitivanje je provedeno i bez katalizatora.

Reaktor je napunjen sa 0,7 g katalizatora a stap s 1,5 g PS-E-a. Za ispitivanje bez katalizatora staklena vuna je postavljena na dno reaktora i vrh stapa, te u kućište u svrhu odvajanja katalizatora i zrna pjenastog polistirena. Reaktor i prsten spojeni su i uloženi u peć, gdje je sustav grijan uz prisutnost N<sub>2</sub> (30 mL/min) na temperaturu od 510 °C i u trajanju od 17 min. Na kraju eksperimenta provedeno je čišćenje sustava (30 min). Prije i poslije ulaza stapa u reaktor kontroliran je pritisak da bi se otkrila potencijalna blokada. Kapljevina nastala procesom sakupljena je u kupku (-17 °C) i mjeren je udio pojedinih nastalih spojeva.

Tijekom pirolize pri povišenim temperaturama, ovisno o tipu polimera stvara se kraj lanca ili slučajan dio makromolekule. U prvom slučaju (poli(metil-metakrilat)) količina dobivenih monomera je velika, dok je u drugom (polietilen) količina monomera vrlo niska. Slučaj kod polistirena opće namjene je otprilike negdje u sredini, odnosno to znači da se pojavljuju i krajevi lanaca i slučajni dijelovi makromolekula istovremeno. Količina monomera ovisi o uvjetima kod provođenja eksperimenta i kreće se od 40 – 70 %.

U ovom ispitivanju dobiveni su rezultati za pirolizu sa i bez katalizatora, i to za čisti polistiren i pjenasti polistiren. Rezultati novonastale mješavine prikazani su u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Piroliza polistirena [39]

Katalizator/Materijal	Temperatura (°C)	Plin (%)	Ulje (%)	Koks (%)	Ostatak (%)
<i>PS opće namjene</i>					
Bez katalizatora	510	2,5	89,8	0,1	7,6
FCC katalizator	510	2	83,7	9,8	4,5
BaO katalizator	510	0,7	87	0,3	12
<i>Proizvodi od polistirena</i>					
PS-E	510	6	86,7	0,9	6,4
PS	510	3,6	49,9	30,8	15,7

Iz gornje tablice vidi se da daleko najveći udio nastale mješavine kod pjenastog polistirena otpada na ulja, dok je udio plinova puno manji, no ipak viši nego kod drugih slučajeva. Udio pojedinih plinova u tih 6 % prikazan je u tablici 4.2.

Tablica 4.2 Udio plinova u % [39]

Plin	Bez katalizatora	FCC	BaO	PS-E	PS
Vodik, H <sub>2</sub>	0	26,9	81,6	0	0
Ugljikov dioksid CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	55,4
Ugljikov monoksid, CO	0	0	0	52	0
Metan	21,8	23	4,8	7,2	6,2
Etan, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0	0	0	0	2
Etilen, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	57,9	29,5	6,2	0	10
Propan, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	0	0	0	0
Propilen, C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	11,9	18,6	2,5	2,6	4,7
Butan, nC <sub>4</sub>	0	0	2,7	0	14,6
Pentan, nC <sub>5</sub>	8,4	0	1,2	2,8	1,1
Izopentan, iC <sub>5</sub>	0	2	0	28,9	3,1
C <sub>6</sub>	0	0	1	6,5	2,9
Σ	100	100	100	100	100

Vidljivo je da CO ili CO<sub>2</sub> postoje samo kod gotovih proizvoda od polistirena (PS-E i PS proizvodi), što je i logično budući da čisti polistiren nema atoma kisika, dok se PS-E sastoji od 98 % zraka. Također lako je primijetiti da najveći udio plina kod pjenastog polistirena otpada na pentan (31,7 %).

Dalje, u tablici 4.3 prikazan je udio ulja i otopina kod kojeg je vidljivo da prevladava daleko najveći postotak stirena i to poglavito kod PS-E-a i katalizatora BaO.

Piroliza je najbolji način kemijskog recikliranja kod kojeg se izlučuju velike količine ulja i to poglavito stirena, iako još nije dovoljno istražena mogućnost reprodukcije istog.

Tablica 4.3 Udio otopina u % [39]

Otopina	Bez katalizatora	FCC	BaO	PS-E	PS
Stiren	63,9	45,1	69,6	70	53,3
2,4 Dipenil - 1 - buten	14	1,9	30,4	9	13,2
2,4,6 Tripenil - 1 - heksen	2,2	0,3	0	5,2	3,5
Benzen	0	1,9	0	0,1	0
Toulen	2	3,1	0	2,5	5,6
Etilbenzen	0,5	0	0	1,5	1,9
a - Metilstiren	2,1	6,3	0	2,3	5,9
Ksilen	0	16,8	0	0	0
Indan, Inden	0,3	4,2	0	0,2	2,5
1,2 Difeniletan	2,2	0,9	0	0,8	2,1
1 - metil -1,2 Difeniletan	1,1	0,5	0	0,4	1,4
1,3 - Difenilpropan	0,6	0,5	0	0,8	2,8
1,1' - Difenilpropan	0	1,1	0	0,7	0
Kuman	0	1,7	0	0,3	0,2
Naftalin	0	0,8	0	0	0
Fenantren	0,2	2,6	0	0,3	0,4
Ostalo	10,9	12,3	0	6,1	7,2
$\Sigma$	100	100	100	100	100

#### 4.6.3 Mehaničko recikliranje

Postoje dva tipa mehaničkog recikliranja. Jedno se vrši bez promjene volumena, dok se u drugom postupku pjenastom polistirenu smanjuje volumen.

##### 4.6.3.1 Bez promjene volumena –fino mljevenje

Ovim postupkom mljevenja sakupljeni pjenasti polistiren ne treba posebno razvrstavati nakon sakupljanja niti se trebaju skidati etikete koje su često na ambalaži od PS-E-a. Pomoću drobilica polistiren se usitnjava na relativno velike komade i može se rabiti za više različitih namjena.

Vjerojatno najčešća primjena usitnjenog pjenastog polistirena je u zaštiti osjetljivih proizvoda pri pakiranju. Tako usitnjen polistiren (relativno veliki komadići) ne mora biti određenog previlnog oblika, odnosno nije potrebno da sva zrna budu istog oblika, iako je to češći slučaj, jer svaka tvrtka ima svoj oblik zrna pomoću kojeg se može raspoznati na tržištu. Kutije za pakiranje i transport se napune komadićima pjenastog polistirena i u njih se ulaže proizvod (slika 4.10), te se tako štiti od udara.



Slika 4.10 PS-E za popunjavanje praznog prostora u paketima [31]

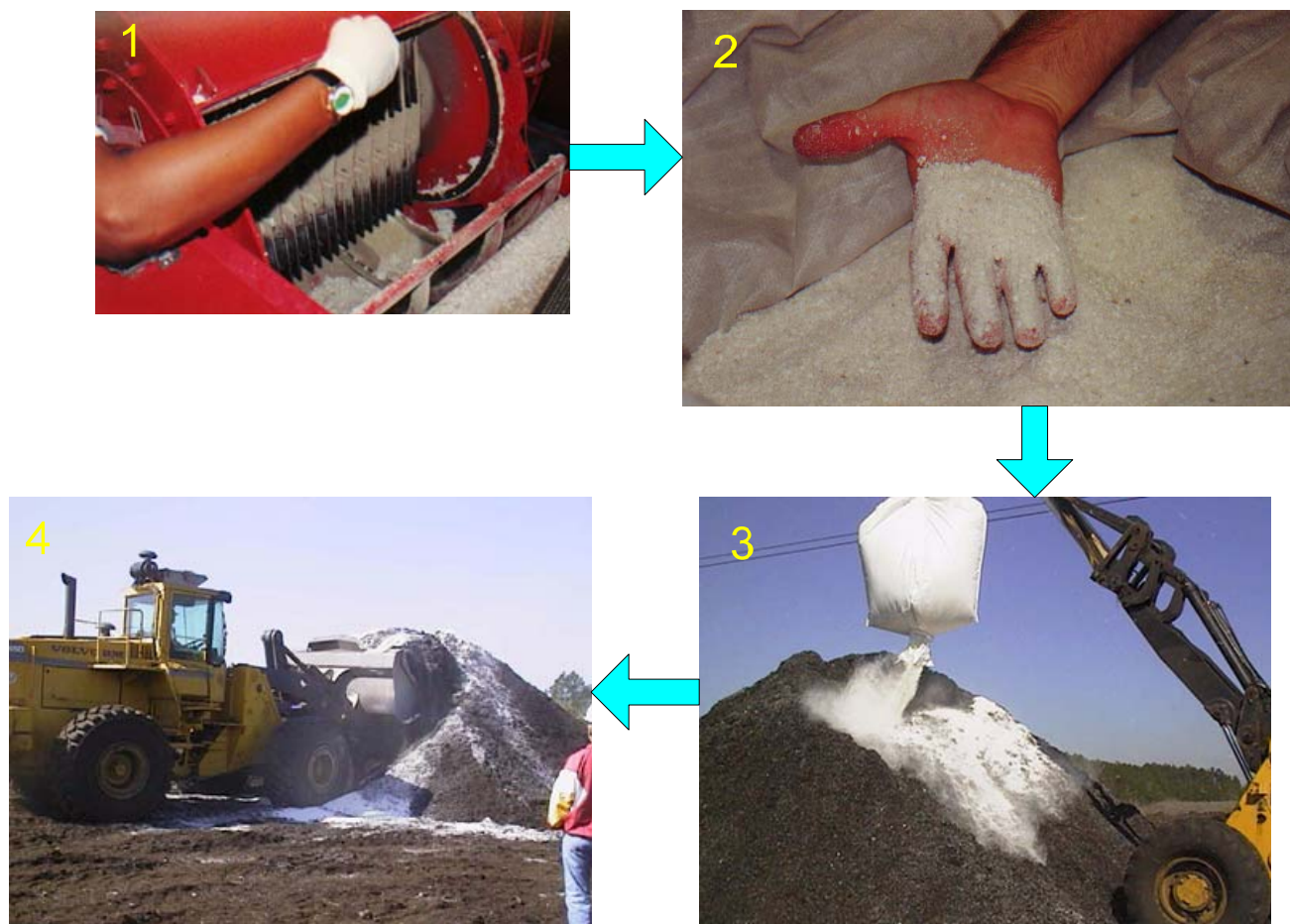
Još jedna od čestih namjena je u vrtovima za obloge rubnih zidova ili stavljanje na određenu dubinu u zemlju, odnosno miješanje u svrhu dobivanja gnojiva (tzv. zemljani polistiren) da bi se zadržala voda ili kišnica. Ovime se smanjuju i nagle i velike promjene u temperaturi kod korjenja biljaka i drveća. Umetanjem polistirena u zemlju želi se smanjiti potreba za perlitom koji se redovito koristi kao dodatak zemlji. Dodavanjem pjenastog polistirena mogu se zamijeniti neka svojstva i zadaće perlita, kao što su već spomenuta drenaža, aeracija i zadržavanje toplinskih svojstava zemlje. Budući da pjenasti polistiren nema rok trajanja, njegovo razlaganje u zemlji je nemoguće. [29]

Ipak jedno svojstvo perlita je nenadomjestivo pjenastim polistirenom. Naime perlit je rupičast i kao takav znatno zadržava vodu u sebi što naravno pogoduje bilju. S druge strane, pjenasti polistiren ima svojstvo zadržavanja vode na svojoj površini, no istraživanjem je pokazano da volumen zadržane vode pomoću PS-E-a iznosi tek 13 % one zadržane od strane perlita. [29]



Na slici 4.6 vide se koraci pri pripremi gnojiva od pjenastog polistirena:

- 1) Mljevenje
- 2) Usitnjeni pjenasti polistiren
- 3) Nabacivanje pjenastog polistirena na gnojivo
- 4) Mješanje



Slika 4.11 Zemljani polistiren [29]

Još jedan sve češći način primjene ovako usitnjenog PS-E-a je sportske prirode. Pjenasti polistiren se stavlja u zemlju na sportskim terenima ispod trave i tako se ublažavaju udarci, odnosno opterećenja koljena ili leđa svih sportaša, te se smanjuje rizik od ozljeda pri padu. [29]



Četvrti relativno česti način upotrebe ovakvog polistirena je miješanje s cementom (slika 4.12). Radi uštede na materijalu i masi u mješavinu pijeska i cementa može se dodati pjenasti polistiren u granulama. Svi testovi vršeni nad takvom mješavinom pokazali su da PS-E u udjelu od 9 % ne utječe na nikakve fizikalne karakteristike betona. U udjelima većim od 9 % primijećen je pad svojstava betona, pa se takva mješavina primjenjuje vrlo rijetko, a gotovo uvijek kod *neopasnih* konstrukcija kao što je pločnik. [29]



Slika 4.12 Mješavina cementa i polistirena [30]

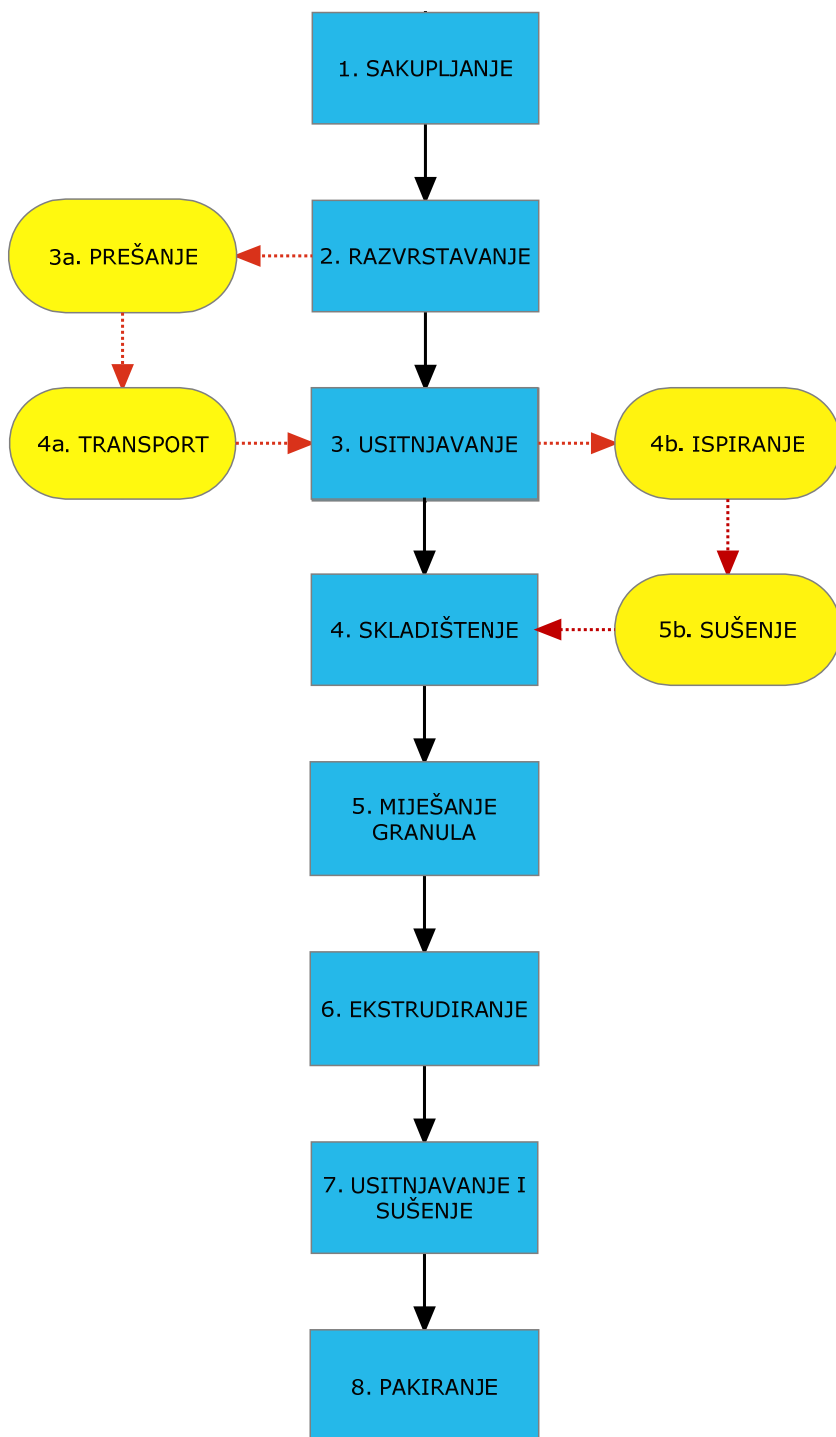
#### 4.6.3.2 Sa smanjenjem volumena

Kad se govori o mehaničkom recikliranju pjenastog polistirena s promjenom, odnosno smanjenjem volumena tu postoje dva glavna načina recikliranja:

- 1) Taljenje
- 2) Otapanje u otopini

#### 4.6.3.2.1 Taljenje

Bez obzira radi li se o mehaničkom ili kemijskom recikliranju postoji nekoliko koraka po kojima se ono provodi:



Slika 4.13 Koraci recikliranja topolinom

## 1. Sakupljanje pjenastog polistirena

Danas u svijetu postoji mnogo centara koji se bave isključivo sakupljanjem i/ili razvrstavanjem različitih vrsta polimera, pa tako i PS-E-a. Postoji nekoliko načina sakupljanja koji se danas uspješno provode, od kojih su tri glavna i čije se varijante koriste.

Prvi način je sakupljanje na lokacijama na kojima se može odlagati pjenasti polistiren (*eng. drop – off*). Ovi centri mogu ne moraju biti samo zgrade ili hale, nego su često i kontejneri koji kad se napune lako mogu biti transportirani do mjesta gdje se polistiren reciklira. Naravno, sakupljanje u gradu u kojem postoji tvornica za recikliranje se odvija u samoj tvornici ili neposrednoj blizini radi uštede na prijevozu. Ovo je najlakši način sakupljanja PS-E-a, no postoji problem kod samog toka otpadnog PS-E-a, odnosno sakupljene količine polistirena koji je često nizak i nepredvidljiv. Naime ovdje količina sakupljenog polistirena ovisi o samom građanstvu, tj. njihovoj volji. [33]

Drugi način su centri koji otkupljuju PS-E. Osnovna razlika u odnosu na *drop-off* centre je ta što ovdje tvrtka koja se bavi sakupljanjem pjenastog polistirena (ili bilo kojeg drugog materijala) plaća dovedeni polistiren, naravno po masi, a ne po volumenu. Ovako se izbjegava problem promjenjivog dotoka polistirena, kao što je slučaj kod *drop-off* centara, jer se često sklapaju ugovori sa tvrtkama ili ugostiteljskim objektima koje rabe ili proizvode pjenasti polistiren o obaveznoj predaji potrošenog PS-E-a. Nažalost gotovo svugdje gdje postoji ovaj način sakupljanja PS-E-a potrebni su državni poticaji, da bi takvi centri opstali, jer prema istraživanju jedna tona tako sakupljenog i kasnije recikliranog pjenastog polistirena košta više nego bi se na njenoj prodaji kasnije zaradi. [33]

Sakupljanje po kućanstvima (*eng. curbside collection*) je treći način koji je tipičan za kućanstva u predgrađu i urbanim mjestima. U većini država kao i u Hrvatskoj postoje komunalna poduzeća koja sakupljaju otpad ranije odložen ispred kuće i odvoze ga na odlagališta. Sakupljanje PS-E-a se provodi na isti način, uz napomenu da su materijali unaprijed odvojeni od strane vlasnika otpada. Ovisno o vrsti otpada (staklo, papir, plastika...) on se stavlja u vrećice ili kante određene boje (slika 4.14) i tako olakšava daljnje razvrstavanje otpada.



Slika 4.14 Kante za odvajanje otpada [33]

## 2. Razvrstavanje pjenastog polistirena

Za odvajanje različitih vrsta plastike uveden je već spomenuti identifikacijski kod polimera koji uvelike olakšava i ubrzava ovaj proces, no on kod pjenastog polistirena i ne predstavlja veliku važnost.

Situacija s pjenastim polistirenom je što se tiče ovog koraka relativno jednostavna zbog njegovog karakterističnog izgleda. PS-E je čiste bijele boje te je lako primjetljiv u masi druge plastike i lako se može odvojiti od ostale plastike. Valja napomenut da jedan veliki dio PS-E-a nije potrebno odvajati jer on dolazi izravno iz tvornica koje proizvode pjenasti polistiren kao neiskorišteni višak.

Samo razvrstavanje se u malim pogonima vrši najčešće ručno (otpad se stavlja na vrpčasti transporter i razvrstava), dok je u velikim pogonima najčešće riješeno poluautomatski, odnosno prije ručnog odvajanja postoje metode za predodvajanje koje se najčešće svodi na odvajanje pomoću

vode (pjenasti polistren pluta) ili pomoću topline određenog iznosa. Naime talište pojedinih vrsta polimera je različito.

Naravno, odvajanje pjenastog polistirena od cjelokupnog otpada (primjerice otpada s odlagališta) kao što su metali, papir, drvo, itd. je puno složenije i zahtijeva više koraka, te se kao takvo ne provodi na odlagalištima. Naime kao što je napomenuto samo recikliranje PS-E-a je često neisplativo pa kad bi tome dodali još i kompliciraniji sustav odvajanja, cijeli sustav bi znatno poskupio.

Dakle, odvajanje kod pjenastog polistirena se svodi na odvajanje zaostalih materijala koji su promakli kod samog sakupljanja.

### **3. Smanjivanje volumena**

Treći korak, odnosno smanjenje volumena provodi se u slučajevima kad je potreban transport iskorištenog pjenastog polistirena, odnosno kada se centar za sakupljanje polistirena nalazi daleko od mjesta za recikliranje. Postoje dva načina kojima se provodi smanjenje volumena: hladno komprimiranje i toplinsko komprimiranje.

#### **HLADNO KOMPRIMIRANJE (SABIJANJE) [34]**

Hladno prešanje uključuje rezanje (drobljenje) pjenastog polistirena, njegovo sabijanje u obliku blokova te konačno rezanje istih blokova na određenu dimenziju (najčešće prema paletama).



Slika 4.15 Hladno komprimiranje [34]

Slika 4.15 prikazuje jedno postrojenje za hladno prešanje tvrtke RUNI koja je osnovana 1973. u Norveškoj i koja se specijalizirala za proizvodnju strojeva za prešanje različitog otpada. Nalazi se u samom svjetskom vrhu po proizvodnji strojeva za prešanje.

Cijelo postrojenje drastično smanjuje broj radnih sati u odnosu na dosadašnje tradicionalne PS-E prešalice. Budući da je najveći dio prodaje rezerviran za Skandinavske zemlje u kojima veliki dio gospodarstva otpada na ribarenje, tvrtke su se specijalizirale u komprimiranju kašeta za ribu.

Iako se najveća proizvodnost kreće do  $\sim 240$  kg/h, sama drobilica ima puno veći kapacitet koji može doseći i do 1100 kg/h sprešanog pjenastog polistirena, što odgovara  $\sim 1700$  kašeta za ribu. Usitnjeni PS-E gravitacijski ulazi iz drobilice izravno u dio za komprimiranje, tako da je čitav postupak gotovo u potpunosti automatiziran (izuzev ručnog ulaganja polistirena u drobilicu ili na vrpčasti transporter koji polistiren sam ubacuje u drobilicu). Nakon komprimiranja blokovi pjenastog polistirena se automatski režu na postavljenu duljinu i hidraulički gurnu u stranu, odakle su spremni za paletiranje. Iako postoji više različitih modela strojeva za hladno komprimiranje pjenastog

polistirena njihov omjer sprešanog volumena se uvijek kreće do maksimalno 40:1, odnosno ovim je načinom moguće sprešati PS-E na jednu četrdesetinu prijašnjeg volumena.

#### TOPLINSKO KOMPRIMIRANJE [35]

Noviji načini sabijanja pjenastog polistirena koji se danas sve više koriste u svijetu je toplinsko komprimiranje. U daljnjem tekstu opisati će se postupak jednog od najvećih svjetskih proizvođača strojeva za toplinsko komprimiranje, *Styromelt*.

*Styromelt* stroj tali pjenasti polistiren i tako oblikuje blok (slika 4.16) od PS-E-a kojem je volumen smanjen za čak 95 %. To znači da 2 m<sup>3</sup> pjenastog polistirena nakon obrade izlazi iz stroja u bloku veličine 90 x 25 x 5 [cm]. Blok kasnije može biti skladišten i prodan tvrtkama za recikliranje.



Slika 4.16 Blok PS-E-a nakon izlaza iz styromelta [35]

Sabijeni blokovi su sterilizirani, lagani za rukovanje i mogu biti skladišteni beskonačno dugo, što znači da se postupak može ponavljati koliko god je potrebno da se sakupi dovoljna količina

uskladištenog polistirena. Činjenica da je sabijeni proizvod nakon izlaska iz stroja steriliziran velika je prednost u odnosu na hladno sabijanje. Naime, ambalaža od PS-E-a koja se rabila za pakiranje hrane je nečista i sadrži ostatke hrane ili krvi (meso ili riba), te se toplinskim postupkom ta nečistoća izdvaja od konačnog proizvoda u obliku pare na koju se pazi filtriranjem. Prednost takvog steriliziranog materijala je u tome da je on praktički bez mirisa i može kao što je napomenuto biti skladišten na vrlo duga vremenska razdoblja.

*Styromelt* je specijalno konstruiran za slučajeve kada hladno (hidrauličko) prešanje nije ekonomski ili praktično zadovoljavajuće, te kada je riječ o nečistom pjenastom polistirenu. Njegova mogućnost smanjenja volumena do 95 % znatno smanjuje količinu skladištenog i transportiranog prometa.

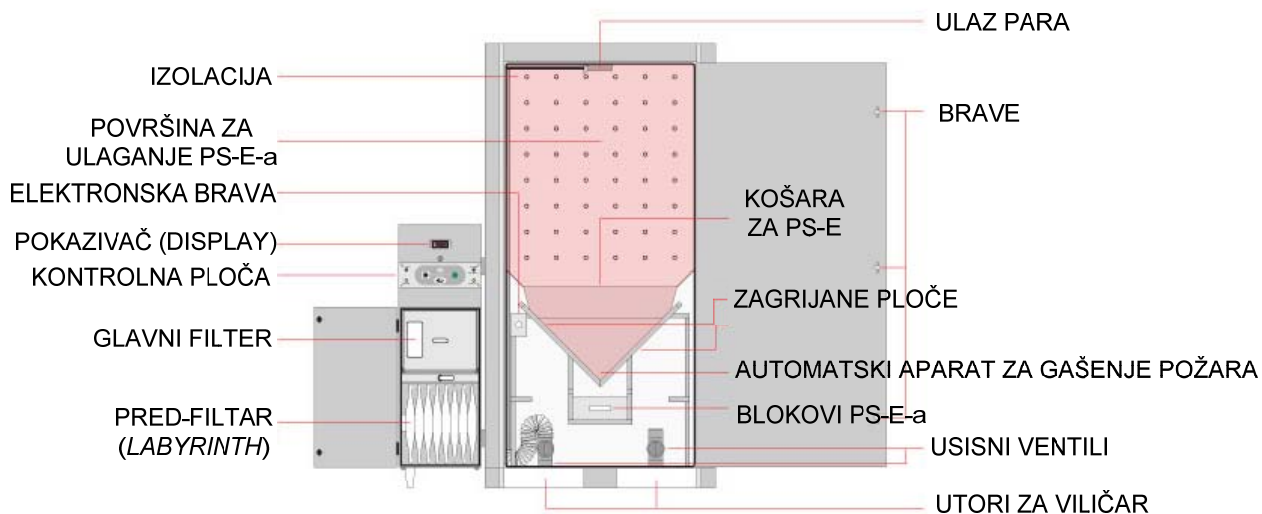
Stroj *Styromelt* jednostavno vrši reverzibilni postupak na PS-E-u koji mora biti sabijen i to pomoću topline koja ga pretvara u rastaljeni materijal koji se nakon toga hladi u blokove. Stroj (slika 4.17) ne sadrži nikakve oštrice, noževe ili bilo kakve pokretne dijelove te je praktički nečujan. Cijeli proces je vrlo jednostavan i svodi se na uključivanje i isključivanje. Ergonomija stroja je takva da eliminira mogućnost da operator dodirne vruću površinu, a vrata su elektronski podešena na otvaranje tek kad je rukovanje nastalim blokovima sigurno.



Slika 4.17 Stroj *Styromelt* [35]



Zrak se filtrira pomoću visoko kvalitetnog *Labyrinth* filtra i specijalnog ugljičnog glavnog filtra. Emisije se svode na paru i miris stirena. Propisano najveće izlaganje stirenu je  $200 \text{ ppm/m}^3$ , a iznosi kod *Styromelta* se kreću do maksimalno  $4 \text{ ppm/m}^3$ . Također postoji i automatski sustav za gašenje požara, iako je sama konstrukcija stroja (slika 4.18) takva da je širenje požara onemogućeno što je i dokazano eksperimentima.



Slika 4.18 Presjek *Styromelta* [35]

Cijena samog pogona u radu iznosi manje od 1 £/h i predstavlja neznatan trošak s obzirom na smanjenje volumena otpada i mogućnosti daljnje prodaje komprimiranog pjenastog polistirena. Smanjenjem (ili eliminacijom) određenog broja transfera koji se moraju obaviti kamionima smanjuje se potrošnja nafte i emisija ugljika. O kakvom je odnosu riječ vidi se na slici 4.19.

Broj kamiona potrebnih da prenesu sabijeni pjeneći polistiren	
Nesabijeni PS-E	10 kamiona
Hladno komprimiranje	10 kamiona
Toplinsko komprimiranje	1 kamion

Slika 4.19 Ušteda na transportu [35]

U tablici 4.4 dana je usporedba hladnog i toplinskog komprimiranja iz kojeg se vide prednosti ili nedostaci pojedinog načina sa tehničkog aspekta.

Tablica 4.4 Usporedba hladnog i toplinskog komprimiranja [31]

Tvrtka	Vrsta sabijanja	Model	Proizvodnost [kg/h]	Potrebna snaga [kW]	Cijena [£]	Postotak sabijanja [%]
<i>RUNI</i>	Hladno	SK 370	200	16,5	23 000	37
<i>RUNI</i>	Hladno	SK 240	70	7	15 000	37
<i>RUNI</i>	Hladno	SK 120	25	1,5	7 000	37
<i>Taylor</i>	Toplinsko	TP 1000	10	6,5	9 000	90
<i>Taylor</i>	Toplinsko	STYROMELT	35	8	10 000	90
<i>Taylor</i>	Toplinsko		500		150 000	90
<i>Next-tec</i>	Toplinsko	DSRW	250	40	40 000	90

#### 4. Transport

Potreba za transportom ovisi o tome da li je u sklopu postrojenja za komprimiranje pjenastog polistirena i postrojenje za recikliranje. Sam transport se vrši samo kad se sakupi dovoljno pjenastog polistirena da napuni čitav kamion. Ukrećavanje u kamion vrši se ručno, odnosno pomoću viličara te je zbog polistirenovog novog oblika ono jednostavno te je moguće iskoristiti čitav volumen kontejnera za teret kako se vidi na slici 4.20.



Slika 4.20 Utovarivanje blokova pjenastog polistirena [34]

## 5. Usitnjavanje [36]

Nakon što je pjenasti polistiren doveden, on se polaže na vrpčasti transporter i tako automatizirano odlazi do stroja za usitnjavanje gdje je usitnjen u male komadiće radi lakšeg transporta, rukovanja i samog ispiranja.

Može se reći da je ovo jedan od najskupljih koraka (uz ekstrudiranje) u postupku recikliranja i to zbog nekoliko razloga. Prvi i najvažniji je taj što je polistiren, bez obzira koliko se čini lagan i krhak, abrazivan i kao takav troši oštrice noževa. Drugi je taj da je određeni dio uloženog pjenastog polistirena nečist, a ta nečistoća nimalo ne pomaže u očuvanju istih noževa. Treći razlog je taj da se za vrijeme zamjene noževa pogon zaustavlja, a to znači gubitak radnih sati odnosno novca.

Postoji više vrsta strojeva za usitnjavanje, no svi se oni dijele na dvije osnovne konstrukcije, a to su strojevi koji režu i strojevi koji drobe. Svi imaju različite karakteristike i ovisno o postrojenjima može se pričati o boljim ili lošijim, no osnovni odabir stroja vrši se prema nekoliko kriterija:

- čistoći pjenastog polistirena
- ulaznoj veličini pjenastog polistirena
- kapacitetu stroja
- pristupačnosti oštrica.

## **6. Ispiranje**

U slučajevima kada je iskorišteni polistiren doveden izravno u tvornicu za recikliranje (bez sabijanja) sljedeći korak nakon sakupljanja i razvrstavanja obavezno je pranje pjenastog polistirena. Veliki dio polistirena, poglavito ambalaža za hranu dolazi nečist te ga je potrebno temeljito isprati, jer u suprotnom ako se recikliranje nastavi s udjelima nečistoće, postoji opasnost od sniženja tehničkih svojstva PS-E-a, a samim time smanjuje se i broj mogućih upotreba nakon recikliranja.

Samo umakanje PS-E-a u bazene nije dovoljno da bi se skinula nečistoća s površine pjenastog polistirena. Naime ako se takav PS-E ostavi jednostavno u bazenu punom vode i deterdženta, on se neće u potpunosti očistiti, naprotiv izaći će iz bazena u gotovo istom stanju u kojem je bio kada je postavljen u bazen. Dakle da bi polistiren potpuno očistili potrebna je dodatna akcija.

Mora se osigurati određeno trenje polimera sa sapunicom ili deterdžentom, a to se osigurava pomoću pumpi ili rotora. Također se mora osigurati i grijanje vode u tanku jer je odstranjivanje nečistoća lakše pri povišenoj temperaturi.

## **7. Sušenje [36]**

Također se odnosi samo na prethodno oprani PS-E, koji se mora prije skladištenja osušiti. Sušenje je kod polistirena za razliku od ostalih polimera često kompliciraniji postupak, zbog činjenice da se komadići polistirena kad su mokri lagano lijepe jedan za drugog.

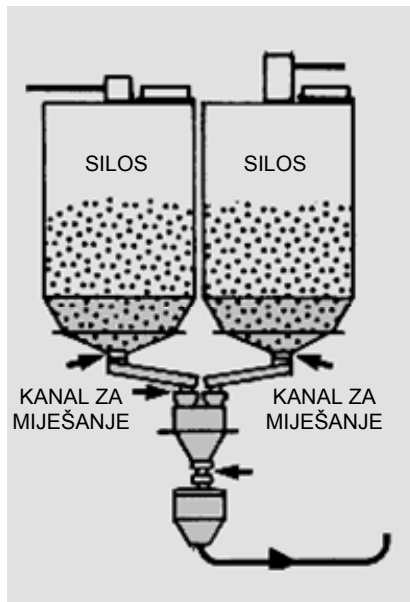
Sustav sušenja radi na principu centrifuge i vrlo je jednostavne konstrukcije. Sastoji se od rotirajućeg bubnja ne previše različitog od mašine za rublje, što znači da je jednostan za održavanje. Osim što ovakav sustav omogućuje sušenje pjenastog polistirena, on dok radi također vrši i sekundarno pranje, jer pod utjecajem centrifugalnih sila stvara se trenje između kapljica vode i same površine komadića pjenastog polistirena.

U slučaju da PS-E u recikliranje uđe s višim udjelima vlage posljedice će biti prikazane u obliku gubitka svojstava novog proizvoda. Upravo zbog ovoga današnja postrojenja imaju vrlo visoku učinkovitost i PS-E na izlazu ima udio vlage 0,5 – 0,6 %. Oдавde se polistiren dodatno suši pomoću cirkulacije vrućeg zraka (poput sušila za kosu) da bi se udio vlage potpuno uklonio.

## 8. Skladištenje

Nakon sušenja, zrna pjenastog polistirena se usipavaju (skladište) u silose, i to omogućava kontinuirani tok zrna PS-E-a u stroj za ekstrudiranje. U pogonima koji se bave recikliranjem raznih vrsta iskorištenog pjenastog polistirena (PS-E za izolacije, ambalaže, pakiranje...) nemoguće je pronaći zrna iz istog izvora i potpuno istih karakteristika. Upravo zbog toga postoje silosi za zrna PS-E-a. Konstrukcija je uvijek izvedena tako da postoje dva ili više silosa spojena kanalima na izlazu (slika 4.21) da bi polistiren pri ulazu u ekstruder bio izmiješan.

Ovo možda ne osigurava najvišu kvalitetu recikliranog PS-E-a, koja bi se postigla recikliranjem pjenastog polistirena istog izvora i karakteristika, (npr. recikliranje škarta iz tvornica koje proizvode pjenasti polistiren), ali osigurava konstantnu kvalitetu.



Slika 4.21 Silosi za miješanje [36]

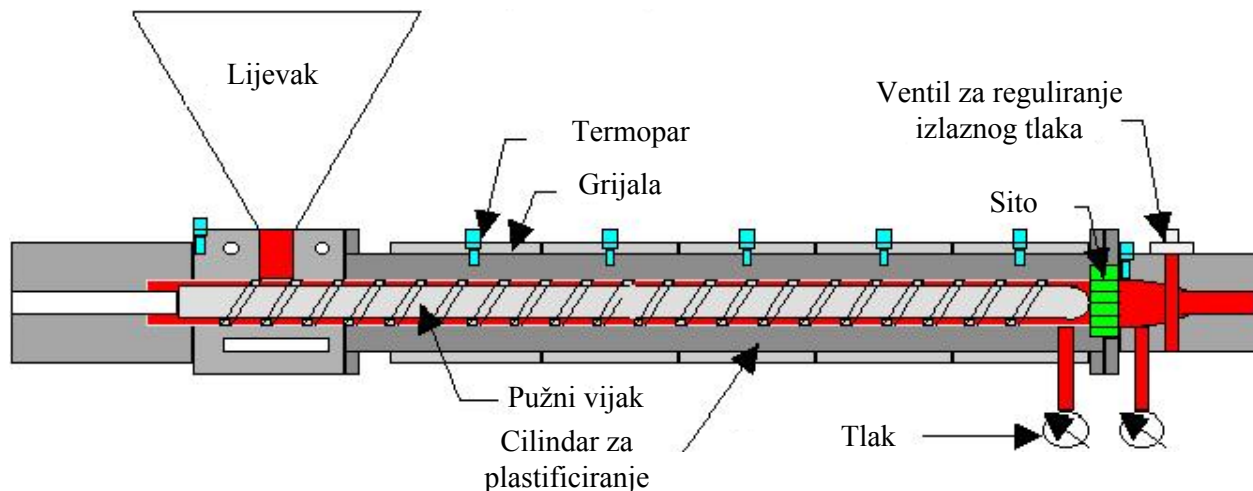
## 9. Ekstrudiranje

Toplina i trenje mijenjaju zrna pjenastog polistirena iz krutine u kapljevinu. Ovim postupkom odvaja se zrak koji se nalazi u taljevini. Na izlazu iz ekstrudera polistiren je u obliku vlakana. [37]

Ekstrudiranje također omogućuje [17] :

- homogenizaciju taljevine i smanjenje razlika u svojstvima recikliranog materijala
- čišćenje materijala filtriranjem taljevine
- dodavanje i disperziju dodataka, stabilizatora, punila itd.

Ekstruderi namijenjeni recikliranju moraju rastaliti pjenasti polistiren i izmješati ga. S obzirom na to da su komadići koji se ekstrudiraju različitih veličina, a moguća je i prisutnost vode od pranja, te apsorbirani plinovi, tijekom postupka potrebno je upotrijebiti prisilne sustave punjenja i uređaje za otplinjavanje. [17]



Slika 4.22 Ekstruder [38]

Veličina masenog protoka kroz prisilni sustav punjenja mora biti prilagođena tako da se pužni vijak u potpunosti napuni, bez prepunjavanja lijevka ili djelomična punjenja vijka, jer bi takve situacije mogle prouzročiti nepravilan rad ekstrudera. [17]

## **10. Granuliranje**

Taljevina se istiskuje iz ekstrudera uglavnom u obliku debelih niti, koje se onda hlade i režu u granule za daljnju uporabu. [17]

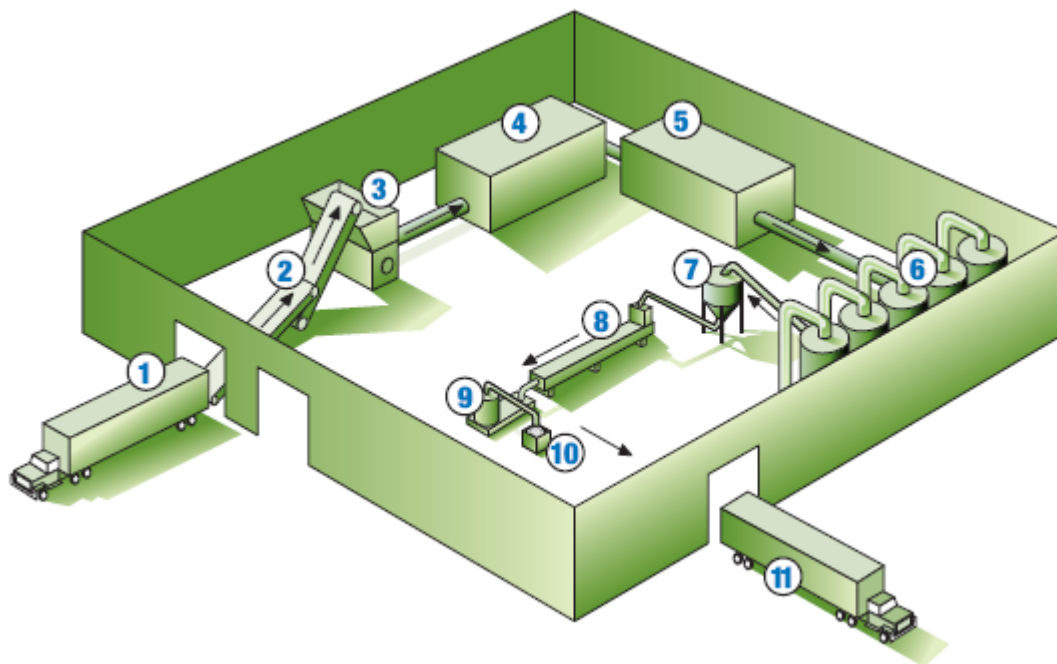
Na izlazu iz ekstrudera niti polistirena su hladene vodom i visoko rotirajuća oštrica noža reže polistiren u sitne komadiće. Voda za hlađenje je kontinuirano filtrirana i ponovo korištena. Voda i zrna gravitacijski padaju na dno sušila. Bubanj sušila vrti se velikom brzinom i centrifugalna sila odvaja vodu od zrna. [37]

## **11. Pakiranje i transport**

Nakon izlaza polistirena u obliku granula, one se pakiraju i transportiraju u tvornice za proizvodnju novih proizvoda od recikliranog polistirena.

## POSTROJENJE ZA RECIKLIRANJE PS-E-a

Nakon opisa svih deset koraka kod recikliranja taljenjem na slici 4.23 vidi se prikaz primjera jednog postrojenja za recikliranje pjenastog polistirena.



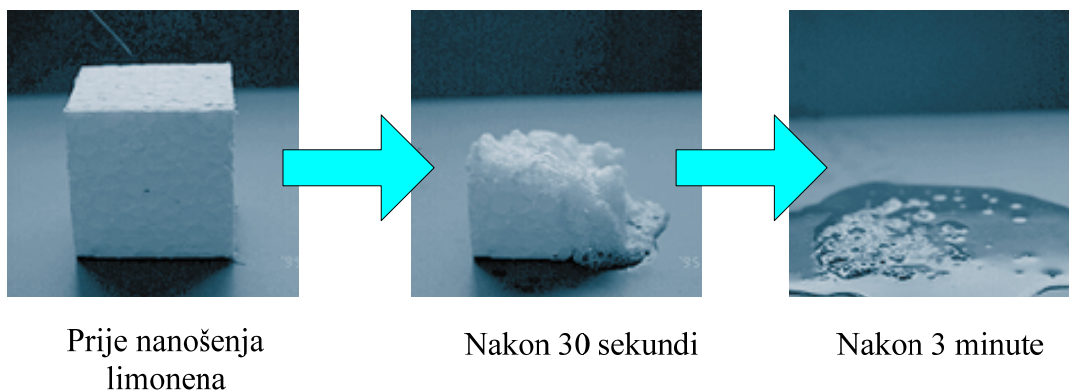
Slika 4.23 Postrojenje za recikliranje [37]

1. Transport pjenastog polistirena u tvornicu
2. Vrpčasti transporteri za odvajanje
3. Usitnjavanje
4. Pranje zrna polistirena
5. Sušenje zrna polistirena
6. Silosi za skladištenje PS-E-a
7. Miješanje zrna PS-E-a
8. Ekstrudiranje pjenastog polistirena
9. Granuliranje
10. Pakiranje
11. Transport recikliranog pjenastog polistirena



#### 4.6.3.2.2 Otapanje u otapalu [40]

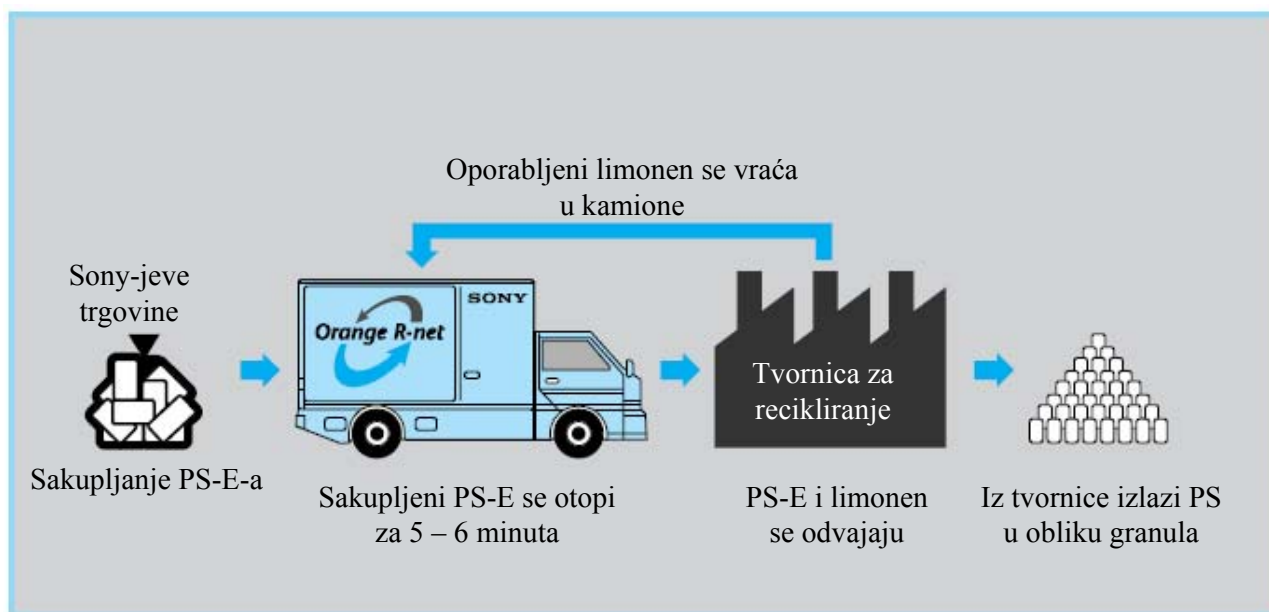
Pjenasti polistiren može se otopiti pomoću soka istisnutog iz kore od naranče. Ako se utrljaju jedno o drugo pjenasti polistiren i kora od naranče primijetit će se udubljenje u PS-E-u. Naravno ova razina razlaganja nije ni približno dovoljna da bi se koristila kao takva za samo recikliranje PS-E-a. No, ako se limonen koji sačinjava oko 0,5 % kore citrusa popraska po pjenastom polistirenu, on će se razlagati naočigled kao što se vidi na slici 4.24.



Slika 4.24 Razlaganje pomoću limonena [40]

Iako su se do sada svi postupci razlaganja pjenastog polistirena vršili pomoću otapala na bazi nafte, ovo je noviji postupak koji mnogo obećava. Predviđa mu se bolja budućnost od svih dosadašnjih postupaka recikliranja pomoću otapanja u otapalu. Ima jednu veliku prednost, budući da je rad s prijašnjim otapalima na bazi nafte bio opasan jer su lako zapaljivi i toksični, dok to kod limonena nije slučaj. Postupak je razvio Tsutomu Noguchi iz Sony-a.

Vrlo je zanimljiv prvi način na koji su u Sony-u koristili ovo novostečeno znanje. Proizveli su kamione (kamioni su se zvali Orange R-net) koji su imali dva spremnika od 270 litara limonena. Sam motor kamiona imao je i funkciju pokretanja miješalice u tankovima, a pjenasti polistiren korišten kao zaštita pri pakiranju elektroničkih uređaja iz Sony-a (npr. za oblaganje televizora) mogao je biti otopljen u potpunosti za 5 – 6 minuta. Znači samo recikliranje počinje već dok kamion transportira pjenasti polistiren. Kamion je bio sposoban nositi oko 300 kilograma PS-E-a, što odgovara PS-E-u korištenom za pakiranje 450 komada 28 inčnih televizora.



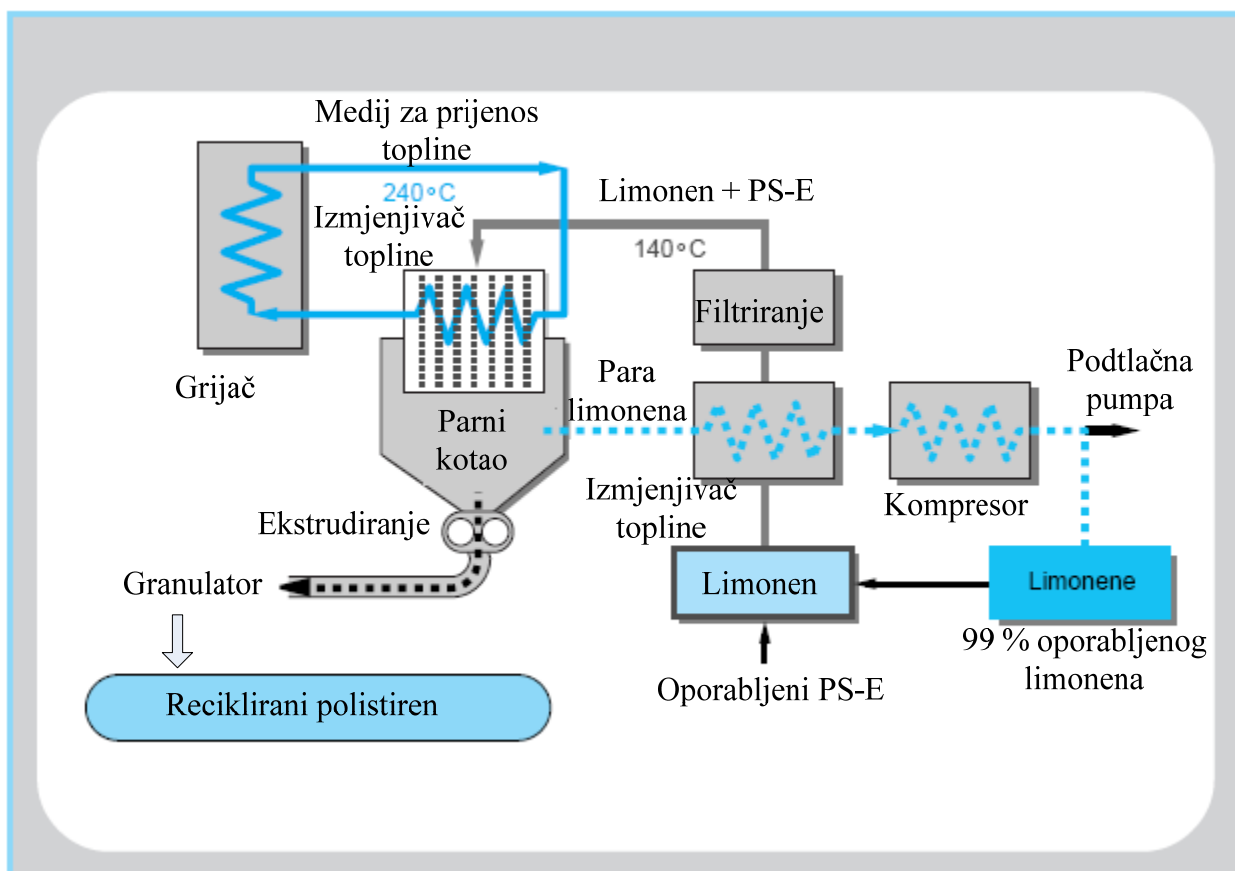
Slika 4.25 Orange R-net kamioni [40]

Na slici 4.25 vidi se shema postupka recikliranja pjenastog polisitrena u Sony-evim kamionima Orange R-net.

Limonen u kojem se je otapao PS-E sada je *smolast*, pa je potrebno odvajanje limonena i polistirena. To se radi pomoću sustava odvajanja podtlačnim isparivanjem. Još jedna prednost limonena je ta da on razlaže samo polistiren, što znači da moguće postojanje papira, naljepnica i ostalih nečistoća ostaje izolirano u sustavu filtara pa se dobiva čisti polistiren.

Sam postupak u tvornici je vrlo jednostavan i relativno jeftin i provodi se u nekoliko koraka. Mješavina limonena i pjenastog polistirena zagrijava se do 140 °C da bi mu se smanjila viskoznost, i tako olakšao protok kroz filtere gdje se sada odvajaju nečistoće. Nakon toga mješavina se dodatno grije na 240 °C i destilira u sustavu podtlačnog isparivanja. Tu isparava samo limonen koji oksidira puno prije polistirena i tako se pomoću podtlačnih pumpa odvaja od polistirena. Preostali polistiren se ekstrudira u obliku niti koje se na kraju pomoću granulatora usitnjavaju.

Oporabljeni limonen se nakon hlađenja opet vraća u kapljevitost i ponovo koristi u istu svrhu nebrojeno puta. Cijeli je postupak grafički prikazan na slici 4.26.



Slika 4.26 Odvajanje polistirena i limonena [40]

Još jedna prednost ovog načina je mala emisija ugljikovog dioksida koji iznosi oko 0,6 kg CO<sub>2</sub> na 1 kg recikliranog pjenastog polistirena, što je ipak manje nego primjerice kod recikliranja taljenjem.

#### 4.6.3.3 Upotreba recikliranog PS-E-a mehaničkim putem promjene volumena

Ovako dobiveni reciklirani polistiren koristi se u nekoliko svrha koje su već napomene a to su primjerice vješalice za robu, kućišta kazeta i CD-a, igračke za djecu, okviri za slike, lonci za biljke, umjetno drvo, itd. (slika 4.27). Isto tako provodi se iako rijede, ponovna proizvodnja pjenastog polistirena koji je kao i svaki reciklirani materijal izgubio neka svojstva, no i dalje je dovoljno dobar za neke upotrebe.

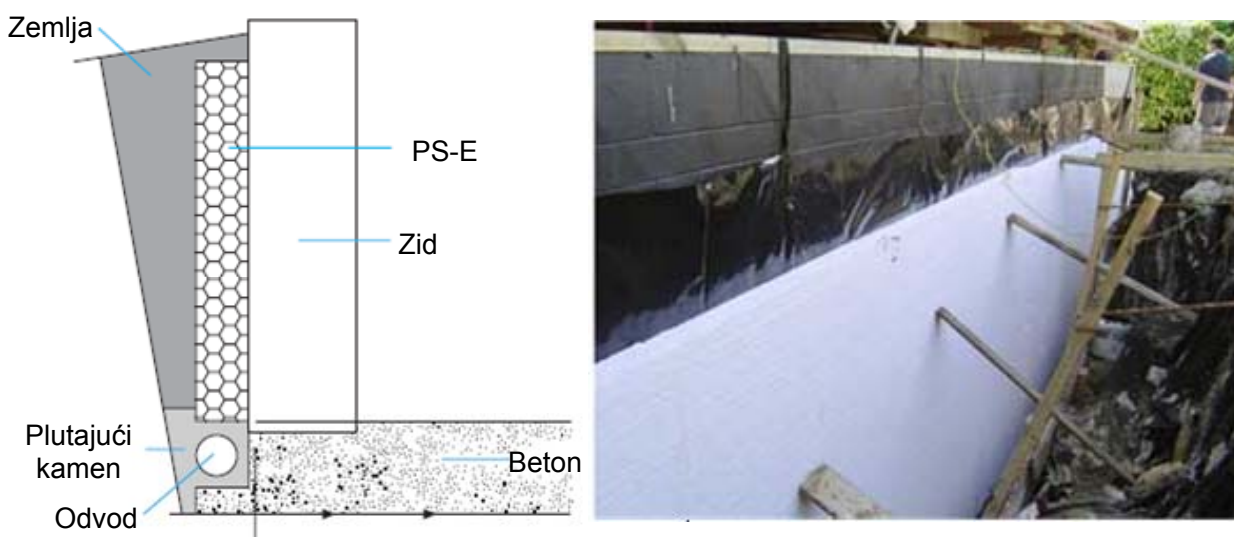


Slika 4.27 Ponovna upotreba mehanički recikliranog PS-E-a

Danas se sve češće koristi način ponovne proizvodnje u obliku ploča koje podsjećaju na one korištene za izolaciju u građevinarstvu. Dobiveni proizvod naravno nije iste čistoće i svojstava kao

*izvorni* pjenasti polistiren, ali to samo po sebi nije ni toliko bitno zato jer je postojanost na vlagu ostalo gotovo nepromijenjena.

Na slici 4.28 vidi se da se ploče od PS-E-a naslanjaju na zidove temelja te nakon toga zakopavaju zemljom ili pijeskom. Visoka postojanost na vlagu te dugotrajnost pjenastog polistirena osiguravaju dugogodišnju neprolaznost vlage.



Slika 4.28 Reciklirani PS-E za izolaciju temelja [28]

## 5. PROIZVODNJA I RECIKLIRANJE PS-E-a U TVRTKI *PLASTFORM*

### 5.1 O tvrtki

Tvrtka *Plastform d.o.o.* (slika 5.1) osnovana je 1992. godine, a osnovna djelatnost tvrtke je proizvodnja pjenastog polistrena za toplinsku izolaciju u graditeljstvu te proizvodnja pjenaste ambalaže za primjenu u industriji i poljodjelstvu. Uz nevedene proizvode izrađuju se i razni dekorativni proizvodi po željama kupaca te granule, krupno i sitno mljeveni pjenasti polistiren za proizvodnju termo žbuka i lakih betona.



Slika 5.1 *Plastform d.o.o.*



Svi proizvodi za toplinsku i zvučnu izolaciju atestirani su u Hrvatskoj i Europskoj uniji, te u njihovom laboratoriju za tvorničku kontrolu kvalitete. U 2005. uveden je i sustav upravljanja kvalitetom ISO 9001 (slika 5.2), a u godini 2006. uvedeno je i CE sustav označavanja proizvoda.



Slika 5.2 ISO 9001 [41]

Certifikat ISO 9001:2000 dokazuje da je sustav upravljanja kvalitetom tvrtke sukladan zahtjevima postavljenim u normama i da je usklađen s propisima. Budući da ga izdaje neovisna certifikacijska kuća, certifikat klijentima daje do znanja da tvrtka ima implementirane nužne interne procese radi ispunjavanja obveza norme. [41]

Međunarodno priznata norma ISO 9001:2000 je općenita. To nije norma nekog određenog proizvoda, već se primjenjuje na sve vrste proizvodnih i uslužnih djelatnosti. Uvela ju je Organizacija za standardizaciju (ISO) sa ciljem uspostave međunarodnih zahtjeva za Sustave upravljanja kvalitetom. [41]

Glavne točke norme su sljedeće:

- sustav upravljanja kvalitetom
- odgovornost uprave
- upravljanje sredstvima
- realizacija proizvoda
- mjerenje, analiza i poboljšanja.

Oznaka CE je kratica francuskih riječi *Conformité Européene* (europska sukladnost).

S oznakom CE (slika 5.3), koja se nalazi na proizvodu, proizvođač izjavljuje da taj proizvod ispunjava bitne zahtjeve sigurnosti, zaštite zdravlja i okoliša koje određuje europska zakonska regulativa, odnosno većina donesenih direktiva za te proizvode. [42]

Za vladine organe CE oznaka na proizvodu je dokaz da se taj proizvod na tržištu pojavljuje legalno. Omogućava jednostavan protok roba unutar jedinstvenog tržišta EU i osnova je da ga carinski organi ili drugi organi nadzora na tržištu mogu koristiti za povlačenje nesukladnih proizvoda s tržišta. [42]



Slika 5.3 CE sustav oznaka

Sporedna djelatnost tvrtke je prodaja trgovačke robe kao što su ekstrudirani polistiren, kombi ploče, hidroizolacija i osnovni materijali za izradu fasada.

Tvrtka 85 % svojih proizvoda prodaje na domaćem, a 15 % na tržištu Europske unije. Uz novo proizvodno postrojenje i 20-godišnje iskustvo uprave i tehničkog osoblja na polju PS-E-a, koji su pod nadzorom *BVQI*, odobrenog sustava za upravljanje kvalitetom, sukladnog normi ISO 9001:2000, tvrtka može jamčiti najvišu kvalitetu njenih proizvoda i usluga.

*Plastform* je najveći distributer proizvoda za izolaciju u Hrvatskoj. Postrojenje za proizvodnju PS-E-a (velikih kapaciteta) je tehnički najmodernije u ovom dijelu Europe. Tvrtka *Plastform* je ujedno jedina koja ima odobrenje za mehaničko recikliranje otpadnog pjenastog polistirena.



## 5.2 Proizvodi tvrtke *Plastform*

Kao što je već napomenuto osnovni proizvodi tvrtke *Plastform* su izolacijske ploče, trgovačkog naziva *Plastopor*. Postoji veći broj *Plastopor* ploča koje tvrtka proizvodi i koje su u skladu sa europskim normama i koje se međusobno razlikuju po toplinskoj provodnosti, toplinskom otporu i gustoći.

Način proizvodnje izolacijskih ploča već je objašnjen u ovom radu, i sastoji se od zagrijavanja zrna polistirena strujom pare. Ekspandiranje i konačni oblik pjenastih blokova dobiva se u kalupima (slika 5.4), a krajnji proizvod, izolacijske ploče, režu se iz blokova vrućom žicom.



Slika 5.4 Blokovi pjenastog polistirena ispred zgrade *Plastforma*

### 5.2.1 *Plastopor F*

*Plastopor F* (tablica 5.1) je pjenasti polistiren koji je odličan izolator, ima mali faktor otpora difuziji vodene pare, na sadrži reciklat i odležan je. Dovoljno je dimenzijski stabilan, teško zapaljiv, mehanička svojstva Eurorazreda E, Te ne utječe štetno na čovjekovo zdravlje i okoliš. Prodaje se u običnom obliku i kao preklopni, što sprječava ulazak građevnog ljepila u spojnice ploča.

Tablica 5.1 Svojstva *Plastopora F* [43]

Debljina (mm)	Toplinska provodnost (W/mK)	Toplinski otpor $R$
40	0,038	1,05
50	0,038	1,3
60	0,038	1,55
70	0,038	1,8
80	0,038	2,1
90	0,038	2,35
100	0,038	2,6
110	0,038	2,85
120	0,038	3,15
130	0,038	3,4
140	0,038	3,65
150	0,038	3,9
160	0,038	4,2
170	0,038	4,45
180	0,038	4,7
190	0,038	5
200	0,038	5,25

*Plastopor F* (slika 5.5) primjenjuje se samo za fasadne toplinske sustave i to za primjenu u povezanim sustavima za vanjsku toplinsku izolaciju koje čine:

- *Plastopor F* za lijepljenje i/ili mehaničko pričvršćivanje na zid
- građevinsko ljepilo sa utisnutom staklenom mrežicom postojanom na lužine
- završni sloj, fasadna dekorativna žbuka.



Slika 5.5 *Plastopor F* spreman za transport

### 5.2.2 *Plastopor T*

Svojstva *Plastopora T* su sljedeća: teško je zapaljiv, Eurorazreda E, jednostavno se ugrađuje, ima dobra svojstva toplinske izolacije i nije postojan na organska otapala.

Primjenjuje se u plivajućim podovima građevina svih namjena za snižavanje vrijednosti razine zvuka udara, topota u podovima između etaža i podovima na tlu te protiv širenja zvukova bočno i prema gore ili dolje.

Tablica 5.2 Svojstva *Plastopora T* [43]

Debljina (mm)	Toplinska provodnost (W/mK)	Toplinski otpor $R$	Dinamička krutost (MN/m <sup>3</sup> )
10	0,42	0,2	24
20	0,42	0,45	17
30	0,42	0,7	14

### 5.2.3 *Plastopor 50 (12)*

Svojstva *Plastopora 50 (12)* su sljedeća: teško je zapaljiv, Eurorazreda E, jednostavno se ugrađuje, dobrih je izolacijskih svojstava, na utječe štetno na čovjekovo zdravlje i okoliš, nije postojan na organska otapala.

*Plastopor 50* (tablica 5.3) primjenjuje se kao toplinska izolacija kada se ne traži nosivost ploča kao kod lagano provjetravanih kosih krovova i ispuna. Oznaka u zagradi pored imena pored imena označava gustoću koja za ovaj tip iznosi 12 kg/m<sup>3</sup>.

Tablica 5.3 Svojstva *Plastopora 50 (12)* [43]

Debljina (mm)	Toplinska provodnost (W/mK)	Toplinski otpor <i>R</i>
10	0,041	0,2
20	0,041	0,45
30	0,041	0,7
40	0,041	0,95
50	0,041	1,2
60	0,041	1,45
70	0,041	1,7
80	0,041	1,95
90	0,041	2,2
100	0,041	2,4
110	0,041	2,65
120	0,041	2,9
130	0,041	3,15
140	0,041	3,4
150	0,041	3,65

#### 5.2.4 *Plastopor 70 (15)*

Svojstva *Plastopora 70 (15)* su sljedeća: teško je zapaljiv, Eurorazreda E, jednostavno se ugrađuje, dobrih je izolacijskih svojstava, na utječe štetno na čovjekovo zdravlje i okoliš, nije postojan na organska otapala.

Primjenjuje se kod unutrašnjih zidova, vanjskih zidova s obzidnom opekom, kosih krovova, stropova, podova sa manjim opterećenjem kao npr. ispod slabo prohodnog estriha (velika podna ploča bez fuga od cementne žbuke, bitumena ili gotovih ploča), nekorištenih tavana te u građevnim višeslojnim elementima gdje se ne očekuje opterećenje veće od 70kPa. Svojstva *Plastopora 70 (15)* prikazana su u tablici 5.4.

Tablica 5.4 Svojstva *Plastopora 70 (15)* [43]

Debljina (mm)	Toplinska provodnost (W/mK)	Toplinski otpor <i>R</i>
10	0,038	0,25
20	0,038	0,5
30	0,038	0,75
40	0,038	1,05
50	0,038	1,3
60	0,038	1,55
70	0,038	1,8
80	0,038	2,1
90	0,038	2,35
100	0,038	2,6
110	0,038	2,85
120	0,038	3,15
130	0,038	3,4
140	0,038	3,65
150	0,038	3,9
160	0,038	4,2
170	0,038	4,45
180	0,038	4,7
190	0,038	5
200	0,038	5,25

### 5.2.5 *Plastopor 100 (20)*

Svojstva *Plastopora 100 (20)* su sljedeća: teško je zapaljiv, Eurorazreda E, jednostavno se ugrađuje, dobrih je izolacijskih svojstava, na utječe štetno na čovjekovo zdravlje i okoliš, nije postojan na organska otapala.

Rabi se kao toplinska izolacija u kosim krovovima, ravnim krovovima i podovima sa srednjim opterećenjem do 100 kPa, kao što su obiteljske kuće, urbane vile, uredi i slično. Svojstva *Plastopora 100 (20)* prikazana su u tablici 5.5.

Tablica 5.5 Svojstva *Plastopora 100 (20)* [43]

Debljina (mm)	Toplinska provodnost (W/mK)	Toplinski otpor $R$
10	0,036	0,25
20	0,036	0,55
30	0,036	0,8
40	0,036	1,1
50	0,036	1,35
60	0,036	1,65
70	0,036	1,9
80	0,036	2,2
90	0,036	2,5
100	0,036	2,75
110	0,036	3,05
120	0,036	3,3
130	0,036	3,6
140	0,036	3,85
150	0,036	4,15

### 5.2.6 *Plastopor 150 (25)*

Svojstva *Plastopora 150 (25)* su sljedeća: teško je zapaljiv, Eurorazreda E, jednostavno se ugrađuje, dobrih je izolacijskih svojstava, na utječe štetno na čovjekovo zdravlje i okoliš, nije postojan na organska otapala.

*Plastopor 150 (25)* primjenjuje se kao toplinska izolacija na ravnim krovovima i podovima s većim opterećenjem do 150 kPa. Proizvođači sintetskih hidroizolacijskih traka preporučuju ga za ravne krovove ispod ovakvih traka. Također ima široku upotrebu kao toplinska izolacija u hladnjačama. Svojstva *Plastopora 150 (25)* prikazana su u tablici 5.6.

Tablica 5.6 Svojstva *Plastopora 150 (25)* [43]

Debljina (mm)	Toplinska provodnost (W/mK)	Toplinski otpor $R$
10	0,035	0,25
20	0,035	0,55
30	0,035	0,85
40	0,035	1,1
50	0,035	1,4
60	0,035	1,7
70	0,035	2
80	0,035	2,25
90	0,035	2,55
100	0,035	2,85
110	0,035	3,1
120	0,035	3,4
130	0,035	3,7
140	0,035	4
150	0,035	4,25

### 5.2.7 *Plastopor 200 (30)*

Svojstva *Plastopora 200 (30)* su sljedeća: teško je zapaljiv, Eurorazreda E, jednostavno se ugrađuje, dobrih je izolacijskih svojstava, na utječe štetno na čovjekovo zdravlje i okoliš, nije postojan na organska otapala.

Primjenjuje se kao toplinska izolacija građevnih konstrukcija sa najvećim opterećenjem višim od 200 kPa, kao što su ravni prohodni krovovi parkirališta, podovi u industriji, u sportskim dvoranama, te kao izolacija u hladnjačama. Svojstva *Plastopora 200 (30)* prikazana su u tablici 5.7.

Tablica 5.7 Svojstva *Plastopora 200 (30)* [43]

Debljina (mm)	Toplinska provodnost (W/mK)	Toplinski otpor <i>R</i>
10	0,035	0,25
20	0,035	0,55
30	0,035	0,85
40	0,035	1,1
50	0,035	1,4
60	0,035	1,7
70	0,035	2
80	0,035	2,25
90	0,035	2,55
100	0,035	2,85
110	0,035	3,1
120	0,035	3,4
130	0,035	3,7
140	0,035	4
150	0,035	4,25

### 5.2.8 *Plastopor ploče s nagibom*

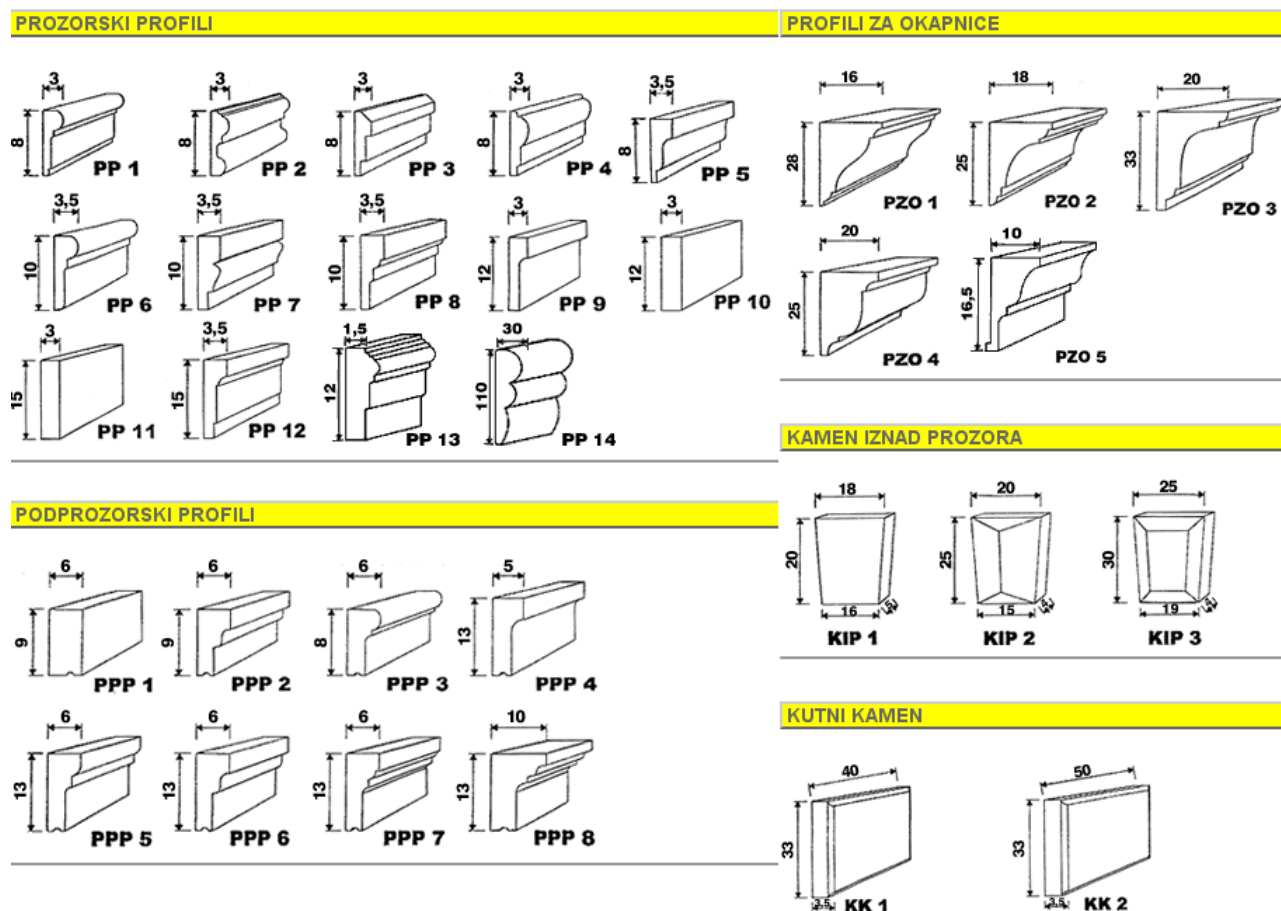
Plastopor ploče s nagibom vrlo jednostavno rješavaju problem odvoda vode na ravnim krovovima prema slivnicima. Ove ploče se ne rade serijski, već po narudžbi. Jednostavno se uzme tlocrt krova s označenim mjestima za odvod vode i stručnjaci u *Plastformu* bez puno problema izrade željenu ploču.



Po isporuci se dobivaju sheme polaganja i označene ploče tako da samo postavljanje ne predstavlja problem. Ploče se primjenjuju kod krovova s opterećenjima u rasponu do 200 kPa.

### 5.2.9 Ostali proizvodi

Osim opisanih izolacijskih ploča, tvrtka *Plastform* proizvodi i dekorativne elemente za fasade u raznim oblicima. Fasade (slika 5.6) se proizvode gustoće od  $15 \text{ kg/m}^3$  i  $20 \text{ kg/m}^3$ , u dimenzijama  $1000 \times 500 \text{ mm}$  i u željenim debljinama. Mogu biti dodatno opremljene stepenastim preklopima i rasterom zareza za smanjenje mehaničkih naprezanja. Upotrebljavaju se kao toplinsko izolacijski sloj u fasadama.



Slika 5.6 Dekorativni elementi za fasade [43]

U tvrtki *Plastform* proizvode se također i termoizolacijske ploče od ekstrudiranog polistirena pritiskne čvrstoće 300 i 500 kPa kod 10 % naprezanja. Namijenjene su za toplinsku izolaciju mjesta s većim mehaničkim opterećenjem, fasada, te za izolaciju podzemnih prostora sa zahtjevom malog upijanja vode.

*Plastopor* kontejneri za presadnice (slika 5.7) su još jedan proizvod tvrtke koji se koriste u poljoprivrednoj proizvodnji za uzgoj presadnica s 209, 170, 160, 104, 84,60, 40 i 24 rupa. Osim praktičnosti, kontejneri od pjenastog polistirena imaju prednost pred sličnim proizvodima na tržištu jer bolje zadržavaju toplinu i vlagu supstrata. Radi toga i same biljke pakirane u takve spremnike imaju uvjete za brže i optimalno napredovanje u rastu i razvoju. Na ovaj način presadnice iz spremnika od PS-E-a brže napreduju i nakon sadnje u polju te se time znatnije skraćuje vrijeme do berbe i povećava prinos. [43]



Slika 5.7 Presadnice od PS-E-a tvrtke *Plastform* [43]

Tvrtka *Plasform* ima i svu potrebnu opremu za izrađivanje logoa, natpisa i grafičkih elemenata kao i razne ambalaže.

### 5.3 Mehaničko recikliranje pjenastog polistirena u tvrtki *Plastform*

Kao što je već spomenuto, sustav recikliranja u tvrtki *Plastform* jedini je u Hrvatskoj i kao takav relativno je dobro organiziran i usklađen. Sam sustav recikliranja je pojednostavljen i završava kod stroja za usitnjavanje, tj. zadnji korak u postupku recikliranja je samo pakiranje zrna pjenastog polistirena u vreće i njihovo skladištenje.

Budući da u Hrvatskoj trenutno postoji potražnja za oporabljenim pjenastim polistirenom samo u obliku fino ili grubo mrvljenih zrna, i to za potrebe miješanja s cementom (gruba zrna) ili sa žbukom (fina zrna), potreba za dodatnim koracima, poput ekstrudiranja i granuliranja za sada ne postoji.

Koraci kod recikliranja pjenastog polistirena u tvrtki *Plastform*, su sljedeći:

1. Transport otpadnog pjenastog polistirena do tvrtke
2. Ručno odvajanje grubih nečistoća
3. Ulaganje u drobilicu
4. Automatski transport u silose
5. Ručno pakiranje zrna pjenastog polistirena u vreće
6. Transport usitnjenog PS-E-a od tvrtke do kupca

*Plastform d.o.o.* za sada reciklira samo čisti pjenasti polistiren, odnosno samo PS-E koji je korišten kao zaštita proizvoda pri transportu. Ovo je upravo zato što je u Hrvatskoj potreba za recikliranim PS-E-om vrlo mala i kad bi se tvrtka odlučila na recikliranje i nečistog pjenastog polistirena (ambalaža za hranu i iskorišteni građevni materijal od PS-E-a) to bi zahtjevalo dodatne strojeve i opremu za pranje, ekstrudiranje, itd.

Tvrtka ima potpisan ugovor s određenim brojem velikih trgovačkih centara, koji dovode svoj otpadni pjenasti polistiren u *Plastform*. Na ovaj način zadovoljne su obje strane. Centri koji se rješavaju velikih količina pjenastog polistirena, i *Plastform* koji na njemu ponovo zarađuje.

Također treba napomenuti da se reciklira i višak pjenastog polistirena koji ostane nakon proizvodnje, preciznije nakon rezanja vrućom žicom. Taj dio PS-E-a se ponovo usitnjava i vraća bez problema u

proizvodnju, jer je čist i kao takav ne šteti strojevima pri radu, te ne utječe na smanjenje svojstva gotovog proizvoda.

**PRATEĆI LIST ZA NEOPASNI / INERTNI OTPAD** Obrazac PL-10/10

---

**1. DIO: PODACI O PROIZVOĐAČU / POSJEDNIKU OTPADA**

Ime proizvođača: KIKA NAMJEŠTAJ D.O.O.  
 Adresa: V. SKOPIČKA 25 ZGB  
 Osoba za kontakt: \_\_\_\_\_  
 Telefon/faks: 01-5499260 01-5499266  
 Matični broj subjekta MBS/MBO: 1827707  
 Ključni broj otpada: 150102 Količina otpada: 20 kg  
 Naziv otpada (vrsta): STIROFOR

Agregatno stanje otpada:  
☒ Krutina ☐ Tekući mulj ☐ Tekućina ☐ Prah ☐ Ostalo

Opis djelatnosti u kojoj je nastao otpad:  
OD ANBACIJE NAMJEŠTAJA

Proces u kojem je nastao otpad: \_\_\_\_\_

Predviđene operacije obrade, uporabe i/ili zbrinjavanja:  
 POSTUPCI OPORABE: R ☐ R ☐ R ☐ R ☐  
 POSTUPCI ZBRINJAVANJA: D ☐ D ☐ D ☐ D ☐  
 KONDICIONIRANJE I/ILI OBRADA: \_\_\_\_\_

Vrsta prijevoznog sredstva: ☐ Vodeno ☐ Zračno ☒ Cestovno ☐ Željezničko

Potpis odgovorne osobe: [Potpis]

Način otpada: ☐ Rasuto ☐ Spremnici  
☐ pakiranja ☐ Posude (do 1 m³) ☐ Cisterne  
☐ otpada: ☐ Plastične vreće ☐ Ostalo

---

**2. DIO: PODACI O SKUPLJAČU / PRIJEVOZNIKU / POSREDNIKU OTPADA**

Ime skupljača: ZAGREBAČKI KUĆNIK e-mail: \_\_\_\_\_  
 Adresa: RAVNICA CESTA 82 ZGB  
 Telefon/faks: 01-6187040 01-6187311  
 Matični broj: 3617702  
 Potpis odgovorne osobe: \_\_\_\_\_

Ime prijevoznika: ZAGREBAČKI KUĆNIK e-mail: \_\_\_\_\_  
 Registracija transportnog vozila: 36-6304 I  
 Datum utovara: godina 2008 mjesec 11 dan 05 Potpis vozača: [Potpis]

Ime posrednika: \_\_\_\_\_ e-mail: \_\_\_\_\_  
 Adresa: \_\_\_\_\_

Potpis odgovorne osobe: \_\_\_\_\_

---

**3. DIO: PODACI O OVLAŠTENJOJ OSOBI ZA OBRADU, OPORABU I/ILI ZBRINJAVANJE OTPADA**

Naziv pravne osobe i građevine: \_\_\_\_\_  
 Adresa: \_\_\_\_\_  
 Telefon/faks: \_\_\_\_\_

Klasa dozvole: UP/I \_\_\_\_\_

Matični broj (MBS/MBO): \_\_\_\_\_

Datum preuzimanja: godina \_\_\_\_\_ mjesec \_\_\_\_\_ dan \_\_\_\_\_ M. P. \_\_\_\_\_ Potpis odgovorne osobe: \_\_\_\_\_

011585

1. Osoba za obradu/oporabu/zbrinjavanje šalje u Ured državne uprave u županiji ili Gradu Zagrebu

Slika 5.8 Obrazac pri predaji otpadnog PS-E-a

Nakon dovoda otpadnog PS-E-a, briga o njemu za stranu koja ga dovodi (slika 5.8 - salon namještaja *Kika*) prestaje i djelatnici tvrtka *Plastform* preuzimaju teret. Kako se ovdje radi o još uvijek relativno malim količinama otpadnog polistirena (u okviru Europe) nema potrebe za njegovim komprimiranjem te on dolazi jednostavno razlomljen u vrećama kao što se vidi na slici 5.9.



Slika 5.9 Dovedeni otpadni PS-E

Ovi veliki komadi pjenastog polistirena se ručno ulažu u jedan od dva stroja za mljevenje (grubo ili fino) gdje se PS-E usitnjava. Na slici 5.10 vidi se ulaganje u stroj za grubo usitnjavanje.





Slika 5.10 Usitnjavanje PS-E-a

Pomoću sustava ventilatora i transportnih cijevi (slika 5.11) zrna pjenastog polistirena transportiraju se u silos (slika 5.12) i tamo skladište, te potom pakiraju u vreće čekajući daljnji transport.



Slika 5.11 Ventilator za transport usitnjenog PS-E-a





Slika 5.12 Silos

Iz silosa se usitnjeni pjenasti polistiren ručno pakira u vreće (slika 5.13) i slaže na transportna kolica (slika 5.14) odakle se dalje odvozi do mjesta skladištenja (slika 5.15) gdje čeka transport do kupca, u ovom slučaju građevinske tvrtke koja će zrna PS-E-a miješati sa cementom.





Slika 5.13 Pakiranje usitnjenog otpadnog PS-E-a



Slika 5.14 Zrna PS-E-a u vrećama



Slika 5.15 Skladištenje pakiranih zrna PS-E-a

Ovako pakirani pjenasti polistiren odlaže se u vanjskom skladištu nakon čega slijedi njegov daljnji transport do kupaca.

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je prikazati ne samo postupke proizvodnje i uporabe pjenastog polistirena u svijetu, već i stanje PS-E-a u svijetu danas i u budućnosti.

Bilo bi idealno kad bi bili u situaciji sve to obraditi s velikim naglaskom na stanje u Hrvatskoj, no na žalost situacija s recikliranjem pjenastog polistirena u Hrvatskoj je takva da postoji samo jedna lokacija za recikliranje PS-E-a u državi što dovoljno govori o spremnosti Hrvatske za ovom vrstom poduzetnosti. Posjetom tvrtki *Plastform d.o.o.* uvjerio sam se da je situacija sa proizvodnjom, a tako i potrošnjom pjenastog polistirena u R.H. relativno visoka i u stalno rastu, što daje naslutiti da bi se recikliranje istog u sljedećim godinama moglo razviti. Naravno kao i u drugim državama koje su bile pioniri ovog recikliranja, u početku će biti neminovni problemi s ekonomske strane, koji bi se mogli kao i u svijetu olakšati državnim subvencioniranjem tvrtki koje se na to odluče.

Što se tiče recikliranja pjenastog polistirena u svijetu, odnosno u razvijenim zemljama, tu je situacija potpuno obrnuta. U zadnjih 10 ili 15 godina odnos recikliranog i proizvedenog pjenastog polistirena stalno raste i iako je taj rast relativno malen, treba uzeti u obzir da cijeli postupak recikliranja često nije ekonomski isplativ.

Dojam stečen tijekom pisanja ovog diplomskog rada je taj da je pjenasti polistiren materijal, jedan od izuzetno važnih polimernih materijala u svijetu. Prednosti njegove primjene su toliko velike, posebno u smislu zaštite okoliša, a oni rijetki nedostaci nimalo ne umanjuju njegovu vrijednost i korisnost. Njegova prava vrijednost dolazi do punog izražaja kad se uzme u obzir njegova raznovrsna iskoristivost u recikliranom obliku. Uvjerena sam da će u budućnosti, kada više ljudi shvati vrijednost pjenastog polistirena njegovo recikliranje postati sasvim uobičajeno i vjerojatno još jednostavnije kao što je nekad bila i situacija s papirom.

## 7. LITERATURA

1. <http://www.plastiquarian.com/>, listopad 2008.
2. [http://www.makingthemodernworld.org.uk/stories/the\\_second\\_industrial\\_revolution/05.ST.01/?scene=6](http://www.makingthemodernworld.org.uk/stories/the_second_industrial_revolution/05.ST.01/?scene=6), listopad 2008.
3. [www.britannica.com](http://www.britannica.com), listopad 2008.
4. History of recycling, <http://www.p2pays.org/ref/26/25070.pdf>
5. <http://members.aol.com/Ramola15/timeline.html>, listopad 2008.
6. [http://en.wikipedia.org/wiki/Plastic\\_recycling](http://en.wikipedia.org/wiki/Plastic_recycling), listopad 2008.
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/Plastic\\_identification\\_code#Plastic\\_Identification\\_Code](http://en.wikipedia.org/wiki/Plastic_identification_code#Plastic_Identification_Code), listopad 2008.
8. [http://geofoam.syr.edu/GRC\\_Manufacture.asp](http://geofoam.syr.edu/GRC_Manufacture.asp), listopad 2008.
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>, listopad 2008.
10. <http://www.bpf.co.uk>, listopad 2008.
11. <http://www.answers.com/polystyrene>, listopad 2008.
12. [http://www.prowall.com/images/Moulding-Machine\\_front.jpg](http://www.prowall.com/images/Moulding-Machine_front.jpg), listopad 2008.
13. [http://lh5.ggpht.com/\\_cTHGGZL6uDw/Rh8kMdIYK\\_I/AAAAAAAAACk/xBLCtFhgyMs/o-machine-2a.JPG](http://lh5.ggpht.com/_cTHGGZL6uDw/Rh8kMdIYK_I/AAAAAAAAACk/xBLCtFhgyMs/o-machine-2a.JPG), listopad 2008.
14. [http://www.foamlinx.com/signs\\_pictures.html](http://www.foamlinx.com/signs_pictures.html), listopad 2008.
15. Elraghi, A.: Selected engineering properties and applications of EPS Geofoam, <http://www.softoria.com/institute/geofoam/material.html#315>, listopad 2008.
16. <http://www.plastics.org.nz/page.asp?id=491>, listopad 2008.
17. Šercer, M., Opsenica, O., Barić, G.: Oporaba plastike i gume, mtg topograf d.o.o., Zagreb, 2000.
18. The EPS life cycle, <http://www.repsa.org.au/Default.aspx?tabid=63>, listopad 2008.
19. The myth of polystyrene takeout food packaging recycling, [http://www.cawrecycles.org/issues/eps\\_recycling](http://www.cawrecycles.org/issues/eps_recycling), listopad 2008.
20. <http://www.styromelt.com/>, listopad 2008.
21. <http://www.integraspec.ie/v1/>, listopad 2008.
22. Long, S.: Polystyrene: Expanding into the future, <http://www.eumeps.org>, listopad 2008.

23. EPS and the environment, <http://www.eps.co.uk/>, listopad 2008.
24. Agency for toxic substances and disease registry: A toxicological profile for styrene, <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts53.html>, listopad 2008.
25. Ehrlich, R.: Economic realities of recycling, [http://www.americanchemistry.com/s\\_plastics/sec\\_pfpg.asp?CID=1436&DID=5228](http://www.americanchemistry.com/s_plastics/sec_pfpg.asp?CID=1436&DID=5228), listopad 2008.
26. <http://www.epsrecycling.org/pages/recycle6.html>, listopad 2008.
27. <http://www.jepsra.gr.jp>, listopad 2008.
28. [http://www.expol.co.nz/styro\\_drain\\_drainage\\_board.htm](http://www.expol.co.nz/styro_drain_drainage_board.htm), listopad 2008.
29. [http://www.dep.state.fl.us/waste/quick\\_topics/publications/shw/recycling/InnovativeGrants/IGyear1/finalreports/duval4.pdf](http://www.dep.state.fl.us/waste/quick_topics/publications/shw/recycling/InnovativeGrants/IGyear1/finalreports/duval4.pdf), listopad 2008.
30. <http://www.alliedfoamtech.com/Appconc.htm>, listopad 2008.
31. <http://www.epspackaging.org/>, listopad 2008.
32. G. Barić: Proizvodnja, preradba i potrošnja polistirena u Europi: Polimeri, Zagreb, 2008.
33. <http://en.wikipedia.org/wiki/Recycling#Collection>, listopad 2008.
34. <http://www.runi.dk>, listopad 2008.
35. <http://www.styromelt.com>, listopad 2008.
36. <http://www.ledarecycling.it>, listopad 2008.
37. Processing recycled foam, <http://www.dartcontainer.com/web/envIRON.nsf/pages/schematic.html>, listopad 2008.
38. <http://in.geocities.com/bolurpc/extrusion1.html>, listopad 2008.
39. D.S. Achilias, I. Kanellopoulou, P. Megalokonomos: Chemical recycling of polystyrene: Aristotle University of Thessaloniki, Grčka i A. Lappas, E. Antonakou: Laboratory of Environmental Fuels and Hydrocarbons: Tesaloniki, <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts53.html>
40. Using oranges for styrofoam recycling, [http://www.sony.net/Products/SCHP/cx\\_news/vol09/pdf/cxeye.pdf](http://www.sony.net/Products/SCHP/cx_news/vol09/pdf/cxeye.pdf), listopad 2008.
41. [http://www.dnv.hr/certifikacija/sustav\\_upravljanja/Kvaliteta/ISO9001.asp](http://www.dnv.hr/certifikacija/sustav_upravljanja/Kvaliteta/ISO9001.asp), listopad 2008.
42. <http://www.siq.hr/index.php?id=1507>, listopad 2008.
43. <http://www.plastform.hr>, listopad 2008.